走近费曼丛书

The Pleasure of Finding Things Out

[美]R·P·费曼 著
张郁乎 译

湖南科学技术出版社



发现的乐趣

走进费曼丛书

The Pleasure of Finding Things Out

[美]R·P·费曼 著

张郁乎 译

湖南科学技术出版社

发现的乐趣

The Pleasure of Finding Things Out　by Richard P. Feynman
Copyright © 1999 by Carl Feynman and Michelle Feynman
Editor's Introduction, chapter introductions, and footnotes copyright © 1999 by Jeffrey Robbins。
Simplified Chinese translation copyright © 2005 by Hunan Science & Technology Press
Published by arrangement with Perseus Publishing, a member of Perseus Books L.L.C.
ALL RIGHTS RESERVED
湖南科学技术出版社通过博达著作权代理有限公司独家获得本书中文简体版中国大陆地区出版发行权。
本书根据 PERSEUS BOOKS 1999 年版本译出。

图书在版编目（ＣＩＰ）数据
发现的乐趣／（美）费曼著；张郁乎译．—长沙：湖南科学技术出版社，2005.9
（走近费曼丛书）
ISBN 7－5357－4415－X
Ⅰ．发…　Ⅱ．①费…②张…　Ⅲ．自然科学—普及读物　Ⅳ．N49
中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 113369 号

走进费曼丛书
发现的乐趣
著　　者［美］R・P・费曼
译　　者　张郁乎
责任编辑　吴　炜　贾平静
出版发行　湖南科学技术出版社
社　　址：长沙市湘雅路 276 号
http://www.hnstp.com
邮购联系：本社直销科　0731－4375808
印　　刷：衡阳博艺印务有限责枉公司
厂　　址：湖南省衡阳市黄茶岭光明路 21 号
邮　　编：421008
出版日期：2005 年 10 月第 1 版第 1 次
开　　本：889mm×1194mm　1/32
印　　张：9
字　　数：192000
书　　号：ISBN 7－5357－4415－X/N・134
定　　价：19.00 元
（版权所有・翻印必究）

目录

序：这样的一种偶像崇拜 1
编者导言 1
1 发现的乐趣 1
2 未来的计算机 27
3 洛斯-阿拉莫斯，从底层开始 53
4 科学文化在现代社会中扮演什么角色？应该扮演什么角色？ 97
5 肯定还有大量的空间 117
6 科学的价值 141
7 理查德·费曼 挑战者号航天飞机调查的小型报告 153
8 什么是科学？ 173
9 世上最聪明的人 193
10 货拜族科学：对科学的一些评论，伪科学以及学习如何不自欺 211
11 和 1，2，3 一样简单 225
12 理查德·费曼 建构一个宇宙 233
13 科学和宗教的关系 253
鸣谢 267
译后赘语 269

序：这样的一种偶像崇拜

“我确实仰慕这个人，我对他的仰慕，就像人们的那种偶像崇拜。”伊丽莎白一世时代的戏剧家本·琼森（Ben Jonson）写道。“这个人”是琼森的良师益友，威廉·莎士比亚（William Shakespeare）。琼森和莎士比亚都是卓有成就的剧作家。琼森是富有学者气质的饱学之士；莎士比亚是即兴的，是个天才。他们之间没有妒忌。莎士比亚年长九岁，在琼森开始写作之前就已经以其杰作称雄伦敦的舞台。正如琼森所说，莎士比亚是个“正直的人，具有开放和自由的天性”，他既给他年轻的朋友提供实际的帮助，又给他鼓舞。莎士比亚给琼森的最大帮助是在琼森的第一部戏剧——《人人高兴》*——中出演主角。这部戏剧于年 1598 上演，获得了极大的成功，标志着琼森职业生涯的开始。那年琼森 25 岁，莎士比亚 34 岁。1598 年后，琼森继续创造诗歌和戏剧，他的许多戏剧都是由莎士比亚的剧团演出的。琼森以诗人和学者的身份著名于世，逝世后获得了安葬于威斯敏斯特教堂**的殊荣。但他对老朋友的情义，从未忘怀。莎士比亚去世时，琼森写了一首诗，《怀念我所敬爱的大师，

* *Every Man in His Humour*，这是一部喜剧。——译者

** *Westminster Abbey*，英国名人墓地。——译者

威廉·莎士比亚》，诗中有这样的名句：

“他不是属于一个时代，而是属于一切时代。”

“虽然你只懂一点点拉丁文，很少的希腊语，
若要从那儿找一些名人来赞喻你，我无须犹豫
而只须呼唤地下那声名震天的埃斯库勒斯、
欧里庇得斯和索佛克勒斯，……
让他们复活，来倾听你悲剧的音步。”

“大自然本身也为他的创造而自豪，
高兴地穿上他诗句织就的华裳，……
然而我决不把一切荣誉献给自然：
我尊贵的莎士比亚，你的艺术，
一定得占它一席之地，因为——
追求自然虽然是艺术家的本事，
但他的艺术确实树立了典型，而且那个
写出生动诗句的人，也一定挥汗如雨，……
因为一个杰出诗人的诗句，浑然天成。”

琼森和莎士比亚与理查德·费曼有什么关系？仅此而已：我可以像琼森那样说，“我的确仰慕这个人，我对他的仰慕，就像人们的那种偶像崇拜。”因为命运的眷顾，我有幸能以费曼为师。我是个学究气的学生，1947年从英国来到康奈尔大学并且立即被天才的费曼接纳。凭着年轻人的自负，我自诩为琼森，而比费曼为莎士比亚。我不曾指望在美洲的土地上遇到莎士比亚，但是如果我看见他，我会一眼认出他来。

在遇到费曼之前，我已经发表过许多数学论文，这些论文充满了小聪明，但总的来说缺乏重要性。当我遇到费曼时，我立即知道我已经进入另一个世界。他对发表漂亮的论文毫无兴趣。他在为理解大自然的作品而奋斗，试图彻底重建物理学，我还从未见谁有过如此高昂的奋斗热情。我很幸运，在他八年的奋斗接近尾声之时遇见他。七年前当他还是约翰·惠勒的学生时所设想的新物理学，这时终于整合成自然的一个统一图景，他称之为“时空通道”。1947 年的时候，这个图景还没有完成，到处是松散的残片，充满着矛盾，但是我当时就看出它一定对。我抓住每一个机会聆听费曼的谈话，学习在他的思想的洪流中游泳。他喜爱谈话，也欢迎我这个听众。于是我们成了终生好友。

我观察了一年，看着费曼完善他那用图像和图表描述自然的方法，直到他拴住所有松散的残片，驱除了所有的矛盾。然后他利用他的图表为向导，开始计算数字。他能够以惊人的速度计算那些可以和实验直接进行比较的物理量。1948 年的暑假，我们可以看到琼森的诗句成为现实：“就连大自然也为他的设计感到自豪，高兴地穿上他的诗句所织就的华裳。”

也是在那一年，我一边和费曼散步、聊天，一边还在研究物理学家施温格和朝永振一郎的著作，他们更多地遵循着传统的路径，并且达到了与费曼相似的结果。施温格和朝永振一郎已经各自独立地取得了成功，在计算相同的物理量时，他们使用了更为费力、更为复杂的方法，而费曼则可以从他的图表直接得出那些量。施温格和朝永振一郎没有重建物理学，他们在撞见物理学时也拿它来用，但是他们仅仅是介绍新的数学方法从物理学中析取数字。他们的计算结果和

费曼一致，当这一点渐渐清楚时，我意识到命运已经赐予了我一个独特的机遇，把这三个理论汇到一起。我写了一篇题为《朝永振一郎、施温格和费曼的放射理论》的论文，阐释为什么说这三个理论看起来不同而实质上一样。我的论文发表在 1948 年的《物理评论》上，标志着我的职业生涯的开始，对于我来说，其决定性的意义正如同琼森的《人人高兴》。那一年我 25 岁，和琼森一样，而费曼 31 岁，比 1588 年的莎士比亚年轻 3 岁。在我的文章中，我谨慎地对待三个主角，给予他们同等的尊严和崇敬；但我心里知道，费曼是这三人中最伟大的一个，我那篇论文的主要目的，是要让他革命性的思想更易于被世界各地的物理学家接受。费曼积极地鼓励我发表他的思想，而从未抱怨我盗用他的声名。他是我剧本中的主角。

我从英国带到美国来的一件珍宝，是J·多佛·威尔逊（J. Dover Wilson）所著的《本色的莎士比亚》*。这是莎士比亚的一个小传，我这里所引琼森的话大部分都是从那儿转引来的。威尔逊的书既不是小说，也不是历史，而是介于两者之间的一个东西。威尔逊所依据的是琼森等人的直接记述，但是威尔逊以他的想象结合稀少的历史文献，复活了莎士比亚。特别是，莎士比亚出演琼森剧作的最早证据，来源于注明为 1709 年的一份文献，其时距离那件事已经一百多年了。我们知道，莎士比亚既是一位著名的作家，也是一位著名的演员，我看不出有什么理由去怀疑威尔逊所讲述的那个传统故事。

幸运的是，为费曼的生活和思想提供证据的文献并不稀

* *The Essential Shakespeare*。——译者

少。眼前的这本书就是这些文献的一个结集，它把费曼记录在他的演讲和随笔中的真实声音展现给我们。这些文献都是非正式的，是面向普通听众发表的演讲，而不是面向他科学界的同事发表的演讲。从这里面我们看到了一个真实的费曼，总是玩着思想的游戏，但是对于他觉得重要的东西又总是那么认真。这些重要的东西是诚实，独立，承认自己的无知。他憎恶等级制度，一生享受着人们的友谊。他像莎士比亚一样，是个有喜剧天赋的演员。

除了对科学的非凡热情，费曼对玩笑以及常人的快乐也有强烈的嗜好。结识费曼一周之后，我给在英国的双亲写了封信，把他描述成“半是天才半是小丑”。在他为理解自然规律而英勇奋斗的间隙，他喜爱和朋友娱乐消遣，喜爱敲邦戈鼓，喜爱用诡计和故事跟各种人开玩笑。这方面他也和莎士比亚相似。我从威尔逊的书中抄出琼森的一段记述：

“他写作时，日以继夜；把自己绷得紧紧的，一点也不放松，他根本想不到放松，直至虚脱；一旦他脱开身后，他又投入各种运动和放松活动；几乎是一种欲望，把他拉向他的书：但是一旦完成，他对悠闲的欲求就会变得更强烈、更热切。”

这就是莎士比亚，这也就是我所认识、我所热爱的费曼——这样的一种偶像崇拜。

弗里曼·J·戴森

普林斯顿高等研究院

新泽西

编者导言

最近我出席了在哈佛大学古老的杰斐逊实验室 *举行的一个演讲会。演讲者是来自罗兰德研究院 **的琳恩郝（Lene Hau）博士，她刚刚做了个实验，不仅著名的科学期刊《自然》报道了这个实验，《纽约时报》的头版也报道了这个实验。在实验中，她（和她的研究组，有学生和科学家）让激光束穿过一种叫做“玻色-爱因斯坦冷凝物”的新物质（一种特殊的量子态，里面有一串几乎被冷却到绝对零度的原子，几乎根本就不动了，一个个像是孤粒子），这种新物质使那光束的速度降低到令人难以置信的优雅慢步，为每小时38 英里（1 英里=1.609 千米，全书同）。我们知道，光的传播速度极快，在真空里为每秒钟 186000 英里，或每小时6669600000 英里。确实，当光通过介质时，比如通过空气或玻璃时，它的速度通常会象征性地慢下来一点，但是减慢的量只是在真空中速度的一小点零头。然而现在我们来做一个算术，拿每小时 38 英里除以每小时 669.6 百万英里，你会看到，现在的速度等于它真空里速度的 0.00000006，或百分之一的六百万分之一。形象地说，就好像伽利略从比

* Jefferson Lab。——译者

** Lowlan Institute。——译者

萨斜塔上落下他的铁球（如果落体的速度也减小那么多倍的话），要两年才能落到地上。

我被这个演讲惊呆了（我想，即使是爱因斯坦也会感到震惊）。在我的生命中，我第一次感受到了一点点理查德费·曼所谓的“发现的震动”，一种突然的情绪（可能类似于顿悟，虽然这次只是间接的 *）使我感悟到自己已经抓住了一个美妙的新思想，感悟到这个世界里有些新东西；感觉到我正亲历一个重大的物理事件，其戏剧性或激动，不亚于牛顿在意识到那个使他头顶上可疑的苹果落向地面的神秘的力其实就是那种使月球环绕地球的力时的情感，或者费曼在朝向理解光和物质间相互作用的本性跨出的勉强的第一步时的情感——那一步最终为他带来了诺贝尔奖。

坐在听众中，我几乎可以感觉到费曼从我肩后看过来，并在我耳边轻语：“看到没有？这就是为什么科学家要坚持他们的探索，这就是为什么我们要为了每一点点知识不顾一切地奋斗，为什么我们要为了寻找一个问题的答案秉烛夜战，为什么我们要翻越那阻碍下一步理解的最陡峭的障碍，以便最终到达发现之旅中临门一脚的快乐时刻。这些都是发现真相之乐的一部分。” **费曼总是说他研究物理不是为了荣誉，也不是为了奖章和奖金，而是因为它好玩，是为了一种纯粹的发现的快乐——探明自然如何运作，什么使它如此准确。

费曼的遗产是对科学的沉醉和奉献——它的逻辑，它的

---

* 因为是听别人的发现，而不是自己亲自发现。——译者

** 另一件最激动人心的事件——如果不是我生命中最激动人心的事情，至少是我出版生涯中最激动人心的事件——是发现长期湮没，以前也从未发表过的三份费曼 1960 年代前期在华盛顿大学所作演讲的记录，它们后来成为《It All 的意义》一书。但是那更多的是发现了某个事物的快乐，而不是探明事物真相的快乐。——编者

方法，它对独断论的反抗，它对怀疑的无限包容。费曼相信，如果以负责的态度运用科学，科学就不仅有趣，而且对人类社会的未来有不可估量的价值。费曼生活在这个信条里。而且，像所有伟大的科学家一样，费曼喜欢把他对自然规律的惊愕与同事以及外行人分享。没有什么地方能够比费曼的这本短作集（大部分以前都发表过，有一篇没有发表过）更能清楚地展现他对知识的热忱了。

要欣赏费曼的奥秘，最好的方法就是读这本书，因为在这里你会看到费曼深入思考过、讨论过的广泛话题，而且他的谈话又是那么有魅力：不仅仅是物理——在教物理方面没有人能超过他——还有宗教、哲学、学术舞台上的怯场；计算机的未来，纳米技术的未来，他是这方面的第一位先锋；科学中的谦逊和乐趣，以及科学和文明的未来；少壮的科学家应该怎么观察世界；导致挑战者号航天飞机空难的可悲的官僚体制的愚昧，使“费曼”成为家喻户晓之词的大标题报道。

值得注意的是，这些短文中甚少重叠，但是有几个地方的故事在另一篇中又重复出现了，我自作主张删掉了其中的一处，省去读者不必要的重读。在删除重复部分的地方，我插进了省略号（……）作为标志。

费曼对严格的语法很不以为意，这一点在大部分由演说或访谈转录过来的篇章里表现得很明显。为了保持费曼的风格，所以一般情况下我让他那些不合语法的词语翻转保留了下来。不过，在有些地方，糟糕或零星的转录弄得某个词或短语无法把握或者很笨拙。为了提高可读性，我做了编辑。我相信这样处理的结果最终没有什么损害，但是可读，是费曼式的。

生前受人称赞，身后受人崇敬，费曼一直是各行各业的

人们的智慧之源。我希望这笔财富——他的最好的演讲、访谈和文章——能够激励一代代忠诚崇拜费曼那颗独特而且常常是桀骜不驯的心灵的人，引起他们的兴趣。

来读读它，享受享受，在读的过程中不妨偶尔大笑几声，或者从中记取二三个人生的教训，受点鼓舞。总之，来体验一下发现一颗不平凡的心灵的快乐。

感谢来自大西洋岸和太平洋岸的米歇尔和卡尔·费曼慷慨、持续的帮助；感谢加利福尼亚理工学院档案室的朱迪思·古德斯泰因博士，邦妮·路德博士和谢莉·爱尔文博士，感谢他们不可缺少的帮助和盛情；特别要感谢弗里曼·戴森教授赐予他那篇优美而且富有启发性的序言。

我还要向约翰·格瑞宾、托尼·黑、梅勒妮·杰克逊和拉夫·莱顿致谢，感谢他们在这本书的整个制作过程中频频给予出色的建议。

杰弗里·罗宾斯

雷丁，马萨诸塞州，

1999 年 9 月

1　发现的乐趣

这篇整理过的费曼访谈录，是1981年为BBC电台“地平线”节目制作的，作为新星的一集在美国播出。其时费曼已度过他一生的主要时光（费曼1988年去世），所以他能从一个年轻人难以具备的角度，反思他自己的经验和成就。于是就有了这个坦率的、无拘无束且很有个性的讨论，讨论了许多接近于费曼内心世界的话题：为什么说仅知事物之名等于对它一无所知；当广岛成千上万人的生命毁灭于原子弹之时，他和他的同事，曼哈顿计划的原子物理学家们，何以能够为他们所制造的这个可怕的武器的成功而痛饮狂欢；还有，为什么说即使没有诺贝尔奖，费曼也照样能够干得很好。

花之美

我有个朋友是艺术家，他的一些观点，我真难以苟同。他拿起一朵花说："瞧，这花多美！"这我没有什么异议。但他接着说："你看，作为艺术家，我用欣赏的眼光看花，看出它的美；可是你们科学家，用分析的方法把花剖析开来看，它就变成一个毫无趣味的东西了。"听他这后半段话，我觉得他简直是一块狂妄的顽石。首先，他所看到的美，旁人能看到，我也能领略到，我相信，即使我没有像他一样受过很好的审美训练，我也能够欣赏一朵花的美。但是，我从这朵花中欣赏到的，他却欣赏不到；作为科学家，我从这朵花中所见到的东西，要远远比他多得多。我能想象这花的细胞，它的细胞里面复杂的运动也自有一种美。我的意思是，不仅在厘米的尺度上有美，在更小的尺度上，或者说在内部结构上，也同样有美。进一步来说，花为了吸引昆虫来授粉而进化出色彩，这本身就是极有趣的事——这意味着昆虫能看到色彩。于是有这样一个问题：这些较低级的动物也有审美的感觉么？颜色为什么引起美感呢？所有这些有趣的问题，表明科学知识只会增加你对花的兴味、神秘感，甚至敬畏。我真的无法理解艺术家们的想法——科学知识怎么会有损于美呢？只会增进美！

逃避人文学科

我向来就一边倒地偏爱科学，年轻一些的时候，我几乎把所有的精力都用在科学上面。我没有时间去学习人们所谓

的“人文学科”，我也没有足够的耐心去应付它，哪怕它是大学的必修课程。不知道什么原因，我总是竭力回避它们，不学这些，也不研究这些。只是到了后来，年纪大一些了，我才放松下来，把眼光稍稍扩展了一点。我学习绘画，也读了一点点东西，但归根结底，我仍然是个偏科很厉害的人，不博学。我把我有限的智慧，集中用于一个特定的方面。

窗里的暴龙

我们家有《大不列颠百科全书》，我还是小孩子的时候，父亲就常常让我坐在他腿上，给我读些《大不列颠百科全书》。比如说，我们读关于恐龙的部分，书上可能讲雷龙或其他什么龙，或者暴龙，书上会说：“这家伙有 25 英尺高，脑袋宽 6 英尺。”这时父亲就停下来，说：“我们来看看这句话什么意思。这句话的意思是：假如它站在我们家的前院里，它是那么高，高到足以把头从窗户伸进来。不过呢，它也可能遇到点麻烦，因为它的脑袋比窗户稍微宽了些，要是它伸进头来，会挤破窗户。”

凡是我们读到的东西，我们都尽量把它转化成某种现实，从这里我学到一个本领——凡我所读的内容，我总设法通过某种转换，弄明白它究竟什么意思，它到底在说什么。（笑）你看，我小时候就习惯了用转换的方法读《百科全书》。想到院子里有个那么大的动物，这真的让人很兴奋，也很有趣。当然，我不会害怕真的会有那么个大家伙进到我的窗子里来，我不会这么想。但是我会想，它们竟然莫名其妙地绝灭了，而且没有人知道其中的原因，这真的非常、非常有意思。

那时候我们常去卡茨基尔*山。我们住在纽约，卡茨基尔山是人们度夏的地方。那儿有个很大的集体，但平日里父亲们全部去纽约上班，只是在周末才回到山中。我父亲回来时，会带我去树林里散步，给我讲树林里正在发生着的各种有趣事情。——我马上就来解释这些事情——其他的母亲看到我父亲这么做，自然觉得很妙，她们认为所有的父亲都应该这样带着儿子出去散步。这些母亲就设法去做那些父亲们的工作，可是劝说毫无成效，于是就想让我父亲带上所有的孩子去散步。我的父亲不愿意，因为他和我有种特殊的关系——我们在一起，有我们自己的事——于是只好作罢，其他的父亲们下周末不得不自己带着孩子去散步。周一，父亲们都回纽约上班了，孩子们在田野里玩，一个伙伴对我说："嘿，看那只鸟。那是什么鸟？"我说："我对这种鸟一无所知。"他说："这是褐喉画眉"，又说，"你爸爸什么也没有告诉你。"但事实恰恰相反，我父亲当然教过我。看着一只鸟，父亲说："知道这是什么鸟吗？这是褐喉画眉；但是在葡萄牙，它的名字是……在意大利，名字是……"，他说，"在中国，名字是……在日本，名字是……"等等。"喏，"他说，"各种语言中你都想知道它的名字叫什么，但是当你知道了所有这些名字之后，你其实对这鸟还是一无所知。你所知道的，仅仅是不同地方的人怎么称呼这种鸟而已。现在，"他说："我们来'看'这只鸟。"

通过这些事，父亲教导我：要去"观察"事物。有一天，我玩一种叫"快速马车"的玩具，那是个小小的马车厢，外围有一圈扶手，以便孩子们推着玩。车厢里面则有一

* Catskill，纽约州东南部的一群矮山。——译者

个球——我记得——里面有个球。在我推车厢的时候，我注意到那个球的运动方向，我于是跑去对父亲说："爸爸，我注意到一个事：当我向前推马车时，球向车厢的后壁滚；我继续推马车，然后突然停下来，这时球向着车厢的前面滚去。"我问："为什么这样呢？"父亲说："没人知道为什么这样，"他说，"运动着的东西，总是试图继续运动下去，而静止的东西，总是试图继续静止下去，除非你用力推它。这是个普遍的原理，物体的这种倾向叫做'惯性'。但是没有人知道为什么这样。"你看，这就是深入理解——他不告诉我一个东西的名字，知道一个东西的名字和了解这个东西是很不一样的，他知道其间的区别，而我也在很早的时候就明白了这个区别。父亲接着说："如果你再仔细看，你会发现，并不是球冲向车厢的后壁，而是车厢的后壁被你推着冲向球。那球仍然静止不动，或者说得更准确些，由于有摩擦力，球开始被带着向前运动，而不是向后。"我赶紧跑回小车，把球重新放好，我一边从下面推车，一边从旁边观察。我发现父亲确实是对的——我向前推小车的时候，车厢里的球从来不向后动。相对车厢而言，它是向后动了；但是相对于人行道，它实际上是向前移动了一点，是车厢带着它向前的。这就是我父亲教育我的方法，他用那些事例和相关的讨论教育我，这里没有压力，只有极可爱、极有趣的讨论。

成人代数

我堂兄比我大三岁，那时他念高中，因为在代数方面感到相当的困难，就请了个家教。家庭教师预备教我堂兄 2x+…之类代数问题时，我得到许可，坐在一个角落里（笑）。我

听见堂兄在谈 x，就对他说:“你想要做什么？”他说:“你知道什么——2x+7 等于 15,”他说，“你得想办法算出 x 是多少。”我说：“4”。他说：“对。可是你是用算术的方法算出来的，现在必须用代数的方法。”这就是为什么我堂兄学不了代数！他不明白要做什么。这不行。幸运的是，我没有去学校学代数，所以我知道，目标只有一个：就是算出 x。至于你怎么算出来的，这并不重要——要知道，什么……用算术算呀，用代数算呀……根本没有那回事。他们在学校里搞出一套规则，以便让所有不得不学代数的孩子都能顺利通过。他们发明出一套规则，你照着他们的规则，不用思考就能找出答案：等式两边减去 7，如果有乘数，两边再除以乘数……等等。通过这一系列步骤，你是可以得出答案，但是你却不理解你到底要做什么。

那时社会上有一系列的数学书，从《成人算术》开始，然后是《成人代数》，然后是《成人三角》，我就从中选了《成人三角》来学。不过，不久我就把它又忘了，因为我没有很好地理解它。但是这系列的书不断出版，图书馆已经预购了《成人计算》，那时我正好从《百科全书》了解到计算学是一门重要的学科，而且很有趣，我该学学。我那年 13 岁，已经大一些了。计算学书终于出来了，我很兴奋，赶紧去图书馆借。她（图书馆的管理员）看着我说：“哦，你还是个孩子，借这本书干什么？这书是大人读的。”你知道，那是我一生中有数的几件尴尬事之一。我撒谎说是替我爸爸借的，是他选中的书。我把书借回家，从它学习计算。我把这事告诉父亲，他想从头读起，可是发现不容易懂。这真让我有点困惑不安，我不知道他的学问竟然这么有限，你知道，我没料到他看不懂——我认为相对简单、相对明白的东

西，他竟然理解不了。我第一次知道，在某种程度上，我已经超过他了。

肩章和教皇

父亲教给我的事情中，除了物理学之外，另有一件事（笑），不管对不对……是对某些“高尚”之事的蔑视。比如说，我还是个小男孩的时候，轮转印刷——那是在报纸上印出的照片——开始出现在《纽约时报》上。他又习惯性地让我坐在他膝盖上，翻开一幅照片，照片上有个教皇，他前面的每个人都向他鞠躬。父亲说：“瞧这些人，有一个人站着，其他的都在鞠躬。区别在哪里呢？这个人是教皇，”——他向来是讨厌教皇的——他说，“区别在于有没有肩章”——当然，这情况不适用于教皇，但是如果这个人是个将军呢——关键往往就在于军服、职位，“但是这个人有着同样的人的问题，像其他人一样，他吃饭，也去浴室洗澡，他有着与其他人同样的问题，他也是个‘人’。为什么他们要向他鞠躬？只是因为他的名字，他的权位，因为他的制服，而不是因为他做了什么特别的事，或者他的荣誉等等。”顺便说一下，父亲当时正在军方工作，所以他清楚一个人穿着制服和脱下制服有什么不同；但对他来说，人就是人，没什么不同。

我想，父亲对我是满意的，我和他在一起的时候，他很快乐。有一次，我从麻省理工学院回去——我在那里有几年了——他对我说：“如今你已经是这方面的学者了，有个问题，我一直没能充分理解，我想你来给我解释解释，你是研究这个的。”我就问他什么问题。他说，他知道当一个原子

从一种状态跃迁到另一种状态时，会射出一个叫做“光子”的光粒子。我说：“是这样。”他说：“那么，这光子是跑出来之前就在原子里呢，还是起先原子里并没有光子？”我说：“原子里本来没有光子存在，光子是在电子做了一次跃迁时出来的。”他继续追问：“那么，它从哪儿来的呢？它是怎么跑出来的呢？”当然，我不能简单地说：“目前人们的观点是，光子不可保存，它们只能产生于电子的运动。”我也不能这样向他解释：比如我现在发出声音，但这声音并不存在于我身体里。这和我的小儿子不同，他在开始说话时，突然说他不能再说一个词——“猫”这个词——因为他的词袋子里的“猫”这个词用光了（笑）。其实，你身体里面并没有词袋子这么个东西，在词跑出来你就用掉它们；你只是在说的过程中创造它们。同样，原子里面也没有光子袋，它们出来时，并不是从某个地方来。我解释得不是很好。在这方面他对我不太满意，我一向没能力把他不理解的东西解释清楚（笑）。可见他也是不成功的，他把我送到这些大学里去，原本是为了替他找出他一直未能找到的答案，可是我没做到（笑）。

应邀研究原子弹

正当他进行博士研究的时候，费曼受邀参加原子弹发展计划。

这是和我原来的研究完全不一样的工作。也就是说，为了做这个工作，我不得不放弃自己的研究——那是我生命的动力——不过我想，为了保护人类的文明，我应该去做。这是我内心的一个矛盾；面临选择，我不得不和自己斗争。我

最初的反应是，我不希望自己正常的研究被打断，而改去做那无味的工作。当然，还有战争的道德问题，这一方面我考虑得不多，但是当我意识到这是什么样的一种武器时，我确实感到有点恐惧，因为既然可能会是那样，就一定会是那样。就我所知，没有任何迹象表明，如果我们成功了，他们就不能成功，所以努力协作十分重要。

1943年上半年，费曼在洛斯-阿拉莫斯*加入了奥本海默的队伍。

关于道德问题，我确实有些想说的话。开展这项研究计划的最初理由是，德国是个威胁。这促使我走上研究原子弹这条路，参加开发初级系统，起先在普林斯顿，后来在洛斯-阿拉莫斯。我们的目的，就是努力让原子弹发挥作用，阻止德国人，所以我们全力以赴改进设计方案，以增加它的威力。在这项工程中，我们大家都非常、非常努力，所有人团结一致，精诚合作。像这一类的工程，你既然已经决定做了，就得不断努力以争取成功。但是——我想这是不道德的——我忘记了初衷，忘记了当初我为什么要去参加那工作。所以，当德国已经失败，开展这项计划的理由已经改变了的时候，我丝毫没有意识到必须重新考虑我为什么要继续这项工作。我只是没有去思考这问题。

成功和痛苦

1945年8月6日，原子弹在广岛爆炸。

我记得，当时唯一的反应——也许我自己的反应已经让

* Los Alamos，美国新墨西哥州中北部城镇，著名的原子能研究中心。——译者

我丧失了理智——是十分得意和兴奋，有许多集会，人们都举杯庆祝，酩酊大醉。你可以想象，洛斯-阿拉莫斯的景象和当时广岛的景象形成了多么巨大而意味深长的反差！我卷入了那个狂欢，也喝酒而且喝醉了，坐在吉普车的蓬顶敲鼓，兴奋地敲着鼓，在洛斯-阿拉莫斯满城跑。而同时，广岛的人们正在死亡、挣扎。

这场性质奇特的战争结束后，我有了个强烈的本能反应——这反应也许是来自原子弹本身，也许是由于其他一些心理因素，因为那时我刚失去了我的妻子。我记得广岛原子弹爆炸后不久，有一天我和母亲在纽约的一家餐馆里——我不记得了，大概在第 59 大街——我想到了纽约这个城……我知道投在广岛的那颗原子弹有多大，它能覆盖多大的地区……我意识到，假如在纽约的 34 大街上扔一颗那样的炸弹，巨大的爆炸会一路卷来，这些人都将死去，这里的一切都会被杀死。而且不会是仅此一颗，继续造原子弹是很容易的。这是一种可怕的宿命，因为我已经看到——我比那些乐观主义者早早就看到——现在、以后的国际关系以及人们的行为方式与他们曾经的做法不会有什么差别，像其他事情一样，这也会重演。而且我相信，人们很快就会适应这一切。因此我感到很不安，我想，我真的认为，这真是太荒唐而无聊了：我若看见人们修一座桥，我就会说“他们不明白。”我真的这么想，造什么都毫无意义，因为不久它就会被毁，但这些建设者却不明白这道理。我对我所见到的所有建筑，都有这个奇怪的观点，我想，他们努力制造，努力建设，这是多么愚蠢啊。……我真的陷入了一种压抑的状态。

“不必依循别人的眼光”

战后，费曼去了克莱尔大学与贝蒂*合作，而拒绝了普林斯顿高等研究院的邀请。

他们肯定以为，给我这份工作我会很高兴。而事实上，我没有那种幸福感。我因此明白了一个新的道理，即我不必顾虑别人认为我应该怎么样；不能因为别人说你这样一来好，你就不得不这样。总之，我终于放下这些负担了，我对自己说，我没有做过什么重要的事，我也不想去做重要的事。但是我一向喜欢物理和数学，也正因为我乐于游戏其中，我在很短的时间里就做出了成果，并因此获得了诺贝尔奖。**

诺贝尔奖——配吗？

费曼因为在量子电动力学方面的工作而获得了诺贝尔奖。

从本质上来说，我做的工作是找出如何控制，如何分析、讨论关于电和磁的量子理论，那理论是在 1928 年就已经发表了的。同时独立进行这项工作的还有日本的朝永振一郎和施温格，我们想，该如何解释那理论以避免不确定性，或者说该如何计算才能在那理论有效时——比如，那理论就

* Hans Bethe（1960~）1067 年诺贝尔物理学奖获得者，他因为原子核反应的理论，特别是关于星体能量的产生的发现而获奖。——编者

** 1965 年的诺贝尔物理学奖由理查德·费曼、朱莉娅·施温格、朝永振一郎分享，他们因为在量子电动力学方面的基础性工作，及其对基本粒子物理的深远影响而获奖。——编者

不适用于核力——所得出的结果与实验在每个细节上吻合。这是我 1947 年做的工作，找出一种描述那理论的数学方法，我因此而获得了诺贝尔奖。

BBC：这成果配得上诺贝尔奖吗？

这（笑）……我对诺贝尔奖一无所知，我不明白它到底是什么，也不明白什么叫值不值。但是，既然瑞士科学院的人决定 x，y，或者 z 赢得了诺贝尔奖，那么就是他了。我不会因为诺贝尔奖而怎么样……这是个痛……（笑）。我不喜欢荣誉。我从自己的工作中得到乐趣，人们也分享我的乐趣。我知道，有许多物理学家用到了我的成果，这就够了，我不认为还需要其他的什么理由。我不觉得是瑞士科学院的某个人判定我的工作有崇高的意义，应该得一个奖——我已经得奖了，这奖就是发现的乐趣，探询工作中的临门一脚，以及看见别人在运用自己的工作成果——这才是真实的，荣誉对我来说并不真实。我不相信荣誉，它烦我。荣誉很烦人，它是肩章，是制服。我父亲就是这样教育我的。我忍受不了荣誉的烦恼，它伤害我。

我在中学里得到的第一个荣誉，是成为穗队的一员。穗队是个由一群成绩好的孩子组成的小组——哈——所以每个人都想成为穗队的成员。我加入穗队后，发现他们在会议上所做的事，就是坐成一圈讨论还有谁有资格进入这个光荣的团体。就这样，我们坐下来努力讨论，决定谁该被吸收进来。由于这个或那个原因——我不理解我自己——这种事在心理上困扰着我，从那时直到现在，荣誉一直让我烦心。在我成为国家科学院成员时，我几乎不得不彻底退休，因为这又是那么一个组织，它的大部分时间都在选择谁比较杰出，谁有资格加入或被吸纳入我们这个团体。其中也包括这样的

问题，比如说，他们有个很出色的化学家，他们想把他吸收进来，那我们物理学家该不该坚持说这里的位置不够？诸如此类。化学家就怎么样了？这组织整个儿连根都烂掉了，它的目的几乎就是决定谁该获得这个荣誉。我不喜欢荣誉。

游戏规则

1950 年至 1988 年，费曼任加利福尼亚理工学院理论物理教授。

把我们试图理解自然的努力，类比为我们试图了解自己的行为的努力，这有点意思。进行这种类比的一个途径，是设想上帝正在玩某种伟大的游戏，比如下棋。你不懂这种游戏的规则，但允许你在场上看，至少可以不时地在一个小角落里观棋。通过这些观察，你试图搞明白这游戏的规则是什么，走棋的规则是什么。片刻之后，你也许发现，比如，当棋盘上只有一个象时，这个象永远走在同一种颜色的格子上。再后来，你会看出象沿对角线走的规则，这将有助于你理解前面发现的那条规则——象留在同一种颜色的格子上。这和我们理解一个原理的过程相似。你发现了一个定理，后来你又发现了对这个定理的一个更深层次的理解。然而，会有变故发生。当时每件事情都在向好的方向发展，你已发现了全部的规则……可是猛然间，在一个角落里，某种陌生的现象发生了，你又得开始去研究这奇怪的现象——你从未预料过的王车易位。顺便说一句，在基础物理领域，我们总是试图去研究那些我们不理解其结果的事情，只有经过彻底的检查之后，我们心里才会释然。

那些不能纳入规则之内的东西，那些出乎你意料之外的

部分，才是最有趣的。在物理学领域，同样可能出现颠覆：你已经注意到象留在同一种颜色的格子上，沿对角线走等等，长期以来人们都是这么以为的；然后有一天你突然发现，在有些棋里面，象并非永远留在同一种颜色的格子上，象的颜色可能改变！直到后来，你发现了一种新的可能，也就是当某只象被吃掉了，或一个兵直下到对手阵营的底线而产生了一个新象，这种情况下象就要变色。可是你开始并不知道这一点。这就和我们的定理很相似：有时候它们好像是绝对的，总是有效，可是突然间，某个小小事件表明它们是错的，于是我们不得不追问：什么情况下，会发生象变色的事情？如此一步步往前走，渐渐地我们终于学会了新规则，这新规则能给它更深刻的解释。不过，物理学与棋戏也有不同的地方。在棋戏里，你越往深处追寻，规则越复杂；而在物理学中，在你发现了新现象时，规则却显得愈发简单。之所以总体上显得更复杂，是因为我的经验更广了——即是说，我们知道了更多的粒子和新现象——于是定理就又显得复杂了。但是，如果你始终意识到那种美妙——即是说，如果我们把经验扩展到越来越大的领域——当我们把每件事都纳入一个整体，我们就得到这些事件的综合，这时规则就比刚开始时所见的简单了。

假如你对物理世界或整个世界的最终特性感兴趣，而目前而言，我们只有通过数学形式的推理才能了解这世界的最终特性，那么，我觉得，一个人不懂数学，他就不能充分欣赏，或根本就不能欣赏这世界的许多特殊方面，规则的统一性的深刻特性，以及事物之间的种种联系。除了数学的途径之外，我不知道还有什么其他的途径能做到这一点；离开了数学，我们没有其他的方法来精确地描绘它……或

者看到其内在的联系。因此，一个人若没有培养出一些数学感觉，是无法充分欣赏世界的这方面特性的——请不要误会，这世界有许多许多方面并不需要数学，比如爱……这些方面很美，很妙，让人感到敬畏、神秘。我也不是说这世界只有物理学，但是你们刚才谈论的是物理学，现在还在谈物理学，那么，不懂数学对于你理解这世界来说就是个严重缺陷。

粉碎原子

好，我目前在物理方面所从事的工作，这是个特殊的话题，我们现在就来谈谈这个问题，我来描述一下我的工作。你们都知道，所有的东西都是由原子构成的，我们的研究早已达到这里了，大多数人也已了解这一点。你们也都知道，原子里面有个原子核，原子核外环绕着运动的电子。核外电子的行为，我们现在已经完全搞清楚了，我们对它的规则了解得很好，我们现在可以用我所说的量子电动力学来预测它的行为。这个问题解决之后，接下来的问题是：原子核如何？核内粒子如何相互作用？它们如何结合在一起？研究这些问题所得到的一个副产品，是发现了裂变并用之制造炸弹。但是，探究把核粒子结合在一起的结合力却是个长期任务。起初，人们认为核力是内部某种粒子的交换。这是由汤川秀树 * 提出来的，交换粒子叫做介子。据他预测，如果用质子——质子是核子中的一种粒子——轰击核子，会撞出介子。确实，这种粒子出来了。

* Hideki Yukawa（1907~1981），因为预言了介子的存在，获得 1949 年诺贝尔物理学奖。——编者

不仅打出了介子，还打出了其他粒子，我们开始不断给它们起名字——k 中介子，Σ 粒子，Λ 粒子等等，现在它们都被称为强子——如果我们增加轰击的能量，我们就能得到越来越多不同的粒子，直到数百种不同的粒子。接下来的问题，当然——这个时期是从 40 年代到 50 年代，直到现在——就是：找出它们背后的规范。在这些粒子中，似乎有许许多多有趣的关系和规范，后来终于有了一个理论来解释这些规范：所有这些粒子都是由其他东西构成的，即它们是由叫做夸克的东西构成的——比如，三个夸克就形成一个质子；质子是原子核中的一种粒子，原子核中还有另一种粒子叫中子。夸克有许多种——实际上，只需三种夸克就能解释所有数百种粒子——它们被称为 u-型，d-型，s-型。两个 u 夸克和一个 d 夸克构成一个质子，两个 d 夸克和一个 u 夸克构成一个中子。它们内部的不同运动方式，将构成其他种类的粒子。现在的问题是：夸克的真实行为究竟是什么样？是什么把它们绑在一起？人们想到一个非常简单、非常类似于量子电动力学的理论——不是真的相同，但十分相似——在这个理论中，夸克类似于电子，而名为胶子的粒子——胶子往来于电子之间，使电子间产生电引力——则类似于光子。它们的数学表达式很相似，不过某些项有些微差别。方程的形式是设定的，方程形式的差别依据美的原则和简单性原则来设定，但它绝不是随意的，它是十分、十分确定的。有多少种不同的夸克，这是随意的，但它们之间作用力的性质不是随意的。

与电动力学不同，在电动力学中，两个电子可以被分开得任意远，当分开很远时，它们之间的力就减弱了。如果对夸克来说也是如此的话，那么当你把物体用足够强的力量撞

在一起时，夸克应该出来。但事实并非如此，当你用足够产生夸克的能量进行实验时，你没看到夸克产生，却看到一个大喷气机——这就是，有各种各样的粒子，像强子一样在相同的方向上运动，但没有夸克。从理论上讲，结果显然应该是这样的：当夸克出来时，形成了一些新的夸克对，它们组成小组团并形成强子。

问题是，为什么在电动力学里，有如此的不同？方程里的这些不同的小项，怎么会产生如此不同的结果——完全不同的结果？实际上，对大多数人来说，这是十分令人惊奇的：也许真是这样，也许你一开始还以为是理论错了，但越研究越发现这些额外项确实很可能产生那些结果。现在，我们处于这么一种状况，这和物理学史上任何其他一个时期都不同，一直不同。我们有个理论，有个关于所有强子的完全的、确定的理论，我们也有大量的实验，许许多多的细节；那么我们为什么不能立即验证一下理论，看它对还是不对？因为我们不得不做的事，首先是算出这理论的结果。如果这理论正确的话，应当如何，事实是否如此？这时我们的困难在第一步。如果理论正确结果应当如何，这很难算出。在目前，算出这个理论的结果所需的数学，已经遇到了难以克服的困难。啊？所以很明显，目前我的任务是找出一个方法，从这理论中得出数据，真正仔细地而不只是定性地检验这理论，看看它能否给出正确的结果。

我花了几年时间，想发明一些数学工具，以便我能够解决那些问题。可是我没有成功，于是我又觉得，为了能够创造出所需的数学，我首先必须对答案可能是什么样的多多少少要有些了解。这很难解释明白，总之，在我得到一个好的定量观念之前，我先得对那现象如何作为有个定性的观念。

换句话说，至今人们还不知道它大致如何作为，所以最近一两年我的工作就是想弄明白它“大致”如何作为，还没有进入定量的层面。希望这种大致的理解将来能够精进为一个明晰的数学工具或运算法则。从关于粒子的理论中得到数学——你看，我们现在的境况很滑稽：我们不是在寻找理论，我们已经得到理论了，而且是一个很好、很好的候选理论；我们是处在科学进程中这样的一步，即我们需要看看从这理论得出的结果，把它和试验进行比较并检验它。“看看这理论的结果是什么样”，我们现在正陷在这个问题里面。这是我的目标，我的愿望就是试试我能不能找到一个方法算出这理论的结果（笑）。这是种令人疯狂的境况：你有个理论，却算不出结果……我受不了，我必须把它搞出来。也许有一天我会成功。

“让乔治去做！”

做真正精深的物理工作，需要有绝对保障的时间。你要把一些想法整合在一起，而这些想法又模糊不清，且不容易记住。这很像搭纸房子，每张纸片都是摇摇晃晃的，你要是忘了其中的一张，整个就又垮了。你不知道是怎么到达这一步的，你又不得不重新搭起它，或者有什么事情中途打断你，然后你完全记不起如何搭起这些卡片了——你的卡片相当于不同类型的想法，你要把这些不同的想法合在一起构成一个理念——问题的关键是，你把材料合在一起造一个城堡，这个城堡很容易倾滑，需要许多关注，也就是说，需要足够有保障的时间去思考，而如果你有了什么行政的事务，时间就没有保障了。所以我就为自己找了个诀窍：不负责

任。我向所有人申明，我什么事也不管。如果有人请我进一个委员会去负责一个录取工作，那么对不起，我不去负这个责任。我丝毫不过问学生的事——当然也考虑一点点，但我知道这些事有其他人去做——我采取这样的态度，“让乔治去做。”你们也许不赞同我这样的态度，因为这样做是不对的。但是我就是这样的，因为我喜欢做物理研究，我想知道我还能不能继续研究下去。我自私，好吧？我想做我的物理研究。

困扰于历史

面对着那一班的学生，你问我怎么教他们最好？我是从科学史的角度教他们呢，还是从应用的角度教他们？我的理论是，最好的教育方式是法无定则，用任何可能的方法去教，不拘一格。这也许有点混乱，让你迷惑，不过这是我所能给的唯一答案。你要在教学的过程中，用不同的办法抓住不同的学生。比如这个人对历史感兴趣却讨厌抽象的数学，另一个人则喜欢抽象而讨厌历史，如果你能择类而教，他们就不会烦，这样你从头到尾都很从容了。我真的不知道如何解决这问题。不同的人有不同的兴趣——什么吸引他们，他们对什么感兴趣，怎样引导他们产生兴趣？我不知道怎么回答这问题。有一种强制的方法，即你必须通过这个课程，你必须参加这个考试。这是个很有效的方法。很多人就是这么度过学校生活的，这个方法（强制方法）也许更有效。抱歉，教了这么这么多年，尝试了各种不同的方法，我还是不知道怎么做。

像父亲，又像儿子

我小时候，父亲告诉我许多东西，这给了我启发，于是我也想告诉我儿子一些对世界感兴趣的事。他很小的时候，我们要哄他入睡，给他讲故事。我就编了个小小人故事。这些小小人有这么高，能走路，会出去野营等等。他们住在空调机里；他们要穿过森林，那里有高大的绿色植物，比如说树，但没有叶子，而且只有一个主干，他们必须在其间行走，如此之类。我儿子渐渐地也就知道了这是毯子，这是毯子的毛，这是绿色的毯子……他喜欢这个游戏，因为我会选择一个奇特的角度描述这些东西。他喜欢听这些故事，我们涉及各种各样奇妙的东西——小小人甚至曾经进过一个雾洞，那里风不断进进出出，冷风进去，热风出来。小小人进的其实是狗的鼻子，我会通过这种方式给他讲所有生理学的内容。他既然喜欢这些，我也就给他讲了许多这类东西；从中我也享受到许多乐趣，因为我讲的正是我感兴趣的，特别是在他要猜我讲的是什么东西时，我们都很兴奋。后来我有了个女儿，我尝试着同样的事，可我女儿是另一种个性，她不愿听这故事，她想听书本上重复的那些故事，重复着读给她听。她喜欢听我读故事，不喜欢我编故事，这是种不同的个性。所以，如果我说教给孩子科学知识的一个好方法是编小小人故事，这对我女儿就毫无效果——但这恰好对我儿子有用。

“不是科学的科学……”

因为科学的成功，所以就有了伪科学。社会科学就是一个例子，它就是那种不是科学的科学。他们不是科学地做事情，而是徒有科学研究的形式——或者，你收集数据，做这做那，但他们得不出任何定律，他们没发现什么。他们尚未达到什么确定的目标——也许某一天他们能达到，但目前来说还没有什么特别的进展。可是现在的情况是，这些“科学”正在更为大众化的层面上流行。我们有各种专家，他们听起来好像是某种科学的专家。其实他们并不是科学专家，他们只是坐在打字机前搞出一些东西，比如，他们会说施有机肥料长出的食物比施无机肥料长出的食物对人更好——这也许对，也许不对，不过至今还没有任何途径来证实它。但是他们会坐在那儿，在打字机前搞出这些资料，好像这是科学，而他们也就成了食品专家、有机食品专家，等等。于是，到处是各种荒诞的东西，到处有各种各样的伪科学。也许我全错了，也许他们确实懂得那些东西，但我觉得我没错。你知道，我有这方面的经验和优势；我知道真正懂得一个事物是多么难，你不得不怎样细心地检查你的实验，多么容易犯错误，多么容易自欺。我了解什么叫“懂得某事”，所以当我看到他们获得信息的方法时，我无法相信他们真的“懂得某事”——他们没有做必要的工作，没有做必要的检验，他们没有必要的谨慎。我很怀疑，他们是否真的不知这资料是错的，他们是些可怕的人。我对世事知之甚少，但这是我的真实想法。

怀疑和不确定性

我们是什么？我们往哪儿去？宇宙的意义是什么？……——如果你期望科学能回答所有这些奇妙的问题，我想你很容易就会醒悟，然后就去为这些问题寻找神秘的答案。我不明白，既然科学的整个精神是理解，科学家怎么能够接受一个神秘答案？——且不去管它。无论如何，这我无法理解。但是，无论如何，如果你想到这个问题，我对“我们正在做什么”这个问题的答案是：我们在探索，我们想尽可能地发现这个世界。人们问我：“你是在寻找物理的终极法则吗？”不，我不，我只是想更多地发现这个世界。如果最后证实确实有一个简单的最终法则，能够解释一切现象，那就有吧，如果能发现这样法则，那当然很好。

如果最后证实这世界没有那个简单的最终法则，而是像个洋葱那样有无数的层次，光是看着这些数不清的层次就够我们头疼、厌倦了，那也没有办法，它就是这样。但是，不管它到底循什么法则，自然自有其本性——“她将走她自己的路”——所以当我们去探索它时，我们不能预定它是什么，我们所能做的仅仅是增进对它的了解。如果你说你的问题是为什么你要对它有更多的了解，如果你认为你努力增进对它的理解，是因为你可以籍此为一些深刻的哲学问题找到答案，那你就错了。发现更多的自然的特征，也许对你那个特殊问题毫无帮助。但我不这么看。我在科学方面的兴趣仅仅是想发现这世界，我发现得越多，越喜欢去发现。

人所能做的事，比动物所能做的事，明显多得多，这个现象里面包含着许多不同寻常的秘密。还有其他类似的问

题。但是那些是我所要去探询的秘密，我事先并不知道答案。我无法相信关于我们与整个宇宙的关系的那些故事，这是专门编出来的，那些故事太简单，太局限，太地方化，太区域化了。地球，他来到地球，上帝之一面来到地球，照看你，看看这儿有了些什么。这太特殊化了。当然，争论这些东西毫无意义，我不去争论，我只是想告诉你，为什么我所具有的科学的眼光，确实对我的信念发生了某些影响。还有，你怎么能够知道一件事是真的？如果不同宗教信仰的人对同一件事有完全不同的解释，你就开始困惑了。一旦你开始怀疑——假设你开始怀疑——你就会问我：科学正确吗？你说，不，我们不知道什么是正确的，我们正要去找出那答案，但什么事都可能是错的。

“什么事都可能是错的”，你试着从这个角度去理解宗教。我们来看看。你一旦这么想，你就开始滑下一个边缘，再也难以翻上去了。从科学的观点，或我父亲的观点，我们应当习惯于去问——什么是对的？什么可能对，什么可能不对？一旦你开始怀疑——我想，怀疑、追问，这是我灵魂里最基本的一部分——当你怀疑、追问时，“信”就有点难了。

你知道，有一点很重要，即我可以在疑惑、不确定、不知道中生活。我觉得，没有答案的生活，要比有答案但这答案可能是错的这种生活有趣得多。对不同的事物，我有近似的答案、可能的信任以及不同程度的确信，但我对任何事都没有绝对的确信。有好多事情我更是一无所知，诸如“为什么会有我们”这样的问题是否有意义，这个问题究竟什么意思等等。我偶尔也会想想这些问题，但是如果我解决不了它，那我就转而去做别的事，我无须“一定要有答案”。没

有答案，漫无目的地沉浸于一个神秘的宇宙中，这并不让我感到恐惧。事实就是这样，我能说的就这些——那并不会让我感到恐惧。

2　未来的计算机

长崎原子弹爆炸四十年后，曼哈顿计划的参与者费曼先生在日本发表了一次演讲，不过这次演讲的话题是个和平的话题，这个话题至今仍然占据着我们那些最敏感的心灵：计算机的未来。费曼讲到了计算机尺寸的最低限度问题，这个问题使得费曼像是个计算机科学的预言家。本章对某些读者可能有点难度，但是这在费曼的科学贡献上，是很重要的一部分，所以我希望你们能花点时间读读它；你们可以在阅读的过程中，跳过那些很技术的部分。本章结尾部分对费曼所钟爱的一个想法有个简短的讨论，他的这个想法引发了目前纳米技术方面的革命。

很高兴，也很荣幸，能在仁科芳雄教授*的纪念会上发表演讲，他是我所敬重、我所钦佩的位科学家。到日本来谈计算机，真是有点班门弄斧了。不过近来我正在思考计算机的问题，这是受邀前来演讲时我所能想到的唯一主题。

我首先要说说我今天不打算讨论的问题。我想谈计算机的未来，但是计算机在未来最重要的那些可能性发展，恰恰不是我今天所要讨论的。比如，在发展智能机器方面有大量的工作可做，这种机器和人有更好的关系，所以它在输入、输出时的出错率，比我们今天所离不开的复杂程序要低。人们通常称之为人工智能，但我不喜欢这个名字。也许非智能机器甚至会比智能机器工作得更好。

又如，程序语言的标准化问题。目前，语言的种类太多了，也许我们应当选定其中的一种作为标准。（我有点犹豫该不该在日本提这个话题，因为这样做的直接后果也许仅仅是又多了个标准语言。你们现在已经有四种编写程序的方法了，如果在这里进行标准化，结果很明显，只会导致标准的增加，而不是减少！）

另一个有意思的未来问题，是自动修复程序。这个问题值得研究，但我今天不谈它。修复的意思，是纠正一个程序或一个机器里的错误；但是当程序越来越复杂时，修复也就变得出奇地困难。

另一个发展方向，是制造三维的物理机器以代替平面的芯片。这可以分步实现，而不是一下子完全做到。你可以先有几层，然后再逐渐增加层数。另一个重要的装置，是一个

---

* Yoshio Nishina，日本著名物理学家，20 世纪 20 年代初在卡文迪许实验室受教于玻尔数年，其成就主要有著名的克莱因-仁科公式。仁科芳雄是最先把量子力学介绍到日本的科学家，对日本物理学的发展贡献巨大，被尊为日本现代物理之父。

可以自动探测芯片上缺陷的探测器，有了它，芯片就能够自动重启来避免缺陷了。目前我们制造大芯片时，芯片上常常有裂缝或坏点，最后我们只好把整个芯片扔掉。如果我们能制造自动探测器，我们就可以利用其有效的部分，这样效率就高得多了。我之所以提及这些，是想告诉你们，我很清楚未来机器的真正问题是什么。但我今天要谈的问题比较简单，只是那些按照物理规律原则上能够造出来的好东西。换句话说，我要谈的是机器，而不是如何运用机器。

我会谈到制造机器时一些技术上的可能性。我要谈三个话题，一个是并联处理器，这是不久的将来，甚至眼下就要出现的东西，现在正在开发；第二个将来的问题是机器的能量消耗问题，目前看来这是个极限，但实际上并非如此。最后，我想谈谈尺寸问题。机器当然越小越好，问题是按照自然规律，我们造的机器原则上还能小到什么程度？我不讨论这些事情中有哪些真的会在将来出现，这依赖于经济和社会问题，我不想去猜测。

并行计算机

第一个话题谈并联计算机。目前，几乎所有的计算机，传统的计算机，使用的都是冯·诺伊曼*发明的结构或设计：有一个很大的存储器，存放所有的信息；有一个中央区，执行简单的计算。我们从存储器的这个地方取一个数据，又从存储器的另一个地方取一个数据，把这两个数据送到中央的算术单元进行相加，然后把相加的结果送到存储器的另一个

* John von Neumann（1903~1957），是一个匈牙利–美国数学家，被尊为计算机之父之一。——编者

地方。所以我们看，这里有一个强有力的中央处理器，运转得十分、十分快，十分、十分努力；然而在这同时，整个存储器却闲坐在一边，像个牢固的卡片档案柜，极少被用到。显然，如果有更多的处理器同时工作的话，我们的计算就能够进行得更快一些。问题是当你在这个处理器上使用存储器里的某个信息时，另一个处理器可能也需要这个信息，这就造成很大的混乱。由于这些原因，人们得出结论，说很难让许多处理器并行工作。

一种被称为“向量处理器”的比较大的传统机器，已经在这方面采取了一些步骤。当你有时候要在许多不同的项目上进行一个完全相同的步骤时，你也许可以同时处理它们。人们希望，规则的程序能够写成普通格式，然后一个解释程序可以自动发现什么时候使用这种向量功能比较好。小龙虾*和日本的超级计算机所用的就是这种想法。另一种方案是把大量相对简单（但不是很简单）的计算机用某种模式连起来，这样它们就可以一起来处理某一部分的问题。其中的每一台计算机实际上都是独立的，但是在需要的时候它们又可以互相传递信息。比如说加利福尼亚理工学院的宇宙魔方**就成功地实践了这种方案，它代表了许多可能性中的一种。再一种方案是把大量非常简单的中央处理器分配到整个存储器，每个中央处理器只负责存储器的一小部分，在它们之间有一个精细的内部连接系统。麻省理工学院研制的线路机，就是一种这样的机器。它有 64000 个处理器和一个路由系统，每 16 个处理器为一组，每组之间可以相互对话，因此总共有 4000 种路由连接的可能。

* Cray，美国的一个计算机公司，这个公司制造的计算机都叫 Cray。——译者

** Caltech Cosmic Cube，计算机的名字。——译者

我们将看到，应用平行处理的方法，有些科学问题，比如介质中波的传播问题，就很容易对付了。这是因为从逻辑上讲，只要知道了来自相邻区域的压强和压力，任何一个给定空间里任何时候的状态，都是可以计算出来的。每个区域的压强、压力内容可以同时计算出来，而这些边界条件又可以在不同区域之间传播，这就是为什么这种类型的设计可以解决这类问题的原因。事实已经证明，大量各种类型的问题是可以平行处理的。当一个问题足够大而需要进行大量的计算时，平行运算能够极大地提升解决问题的速度，这个原理不仅仅用于科学问题。

那么，两年前认为平行设计很困难的那种偏见又如何呢？事实证明，真正的困难，而且几乎不可能实现的，是想采用一个普通程序，并且希望在这个普通程序上自动解决如何高效地应用并行计算。实际上，我们必须彻底地重新开始考虑这个问题，我们要意识到确实是有平行运算的可能，我们必须对这机器的内涵有个新的理解，并在此基础上彻底重写程序。想高效使用旧程序，这是不可能的——程序必须重写。对大多数工业应用来说，这是个很不利的因素，目前已经遇到了相当的阻力。但是大程序通常属于科学家或其他非官方的、聪明的程序设计员，他们喜爱计算机科学，如果能令计算机更有效率，他们愿意从零开始重写程序。所以将来的情况，可能首先是专家们用新的途径设计复杂的、超大的程序，然后渐渐地大家都不得不跟上来，然后会出现更多用这种途径设计的程序，最后，程序员也不得不学习如何设计这样的程序了。

减少能量损耗

我想谈的第二个话题，是计算机的能量损耗问题。最大型计算机的一个明显的缺陷是需要冷却——我们大量的努力都花在了冷却装置上。我想解释一下，这只不过是因为工程技术很糟糕而带来的后果，绝不是一个根本性问题。在计算机内部，有一小部分信息由一根电压值非此即彼的电线控制，叫做“单信息元”。我们得把这根线的电压从这个值变到那个值，也就是说要充电或者放电。我拿水来做个类比：这就好比我们要往一个容器里注水，使水面达到一个位置；或者放水，使水面达到另一个位置。这仅仅是个类比——如果你更喜欢电学，你可以从电学的角度做一些更精确的思考。我们现在只是在做个类比，它类似于注水事情中从高位倒入水来充实容器（图 1）和打开底部的阀门放掉水来降低水位。在放水时会有个能量损失的问题，因为这过程中水位有个突然的降落——从上面进水的高水位降落到下面的低水位。同样，在你倒进水去重新把容器充满时也有个能量损失。换到电压和电量上来，也是这样。

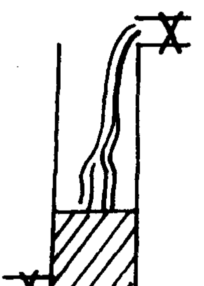


图 1

正如班尼特（Bennett）先生的解释：这就像开汽车，启动时你得发动引擎，停车时你得拉上刹车。每次发动引擎和拉刹车，都损耗能量。对汽车来说，现在已经有了

另一种解决方法，就是把车轮和调速轮连接起来。汽车停止时，调速轮空转，这样就可以节省能量——之后它还能和车轮重新接上，再次启动汽车。与此类似，在水位调节问题上，我们可以用一个U形管，在其底部的中央位置设一个阀门来连接U形管的两臂（图2）。开始的时候阀门关闭，我们在U形管的右臂装满水，而让左臂空着。如果我们打开阀门，水将流向另一边，然后我们再及时关上阀门，让水保持在左臂里。如果我们需要它流向那一边，我们可以再次打开阀门，水又流回那一边，然后我们又把它控制住。当然，这过程中会有些能量的损失，所以水不可能爬到原来的高度，但是这时我们只需加一点点水来补充损失掉的能量就行了——和直接供应的方法相比，采取这种方法时能量的损失要小得多。这个小技巧利用了水的惯性，在电学中，与之相应的则是电感。当然，要在芯片上用我们今天所使用的硅晶体管制造电感，这是非常困难的。所以以目前的技术条件，这个方法不是很实际。

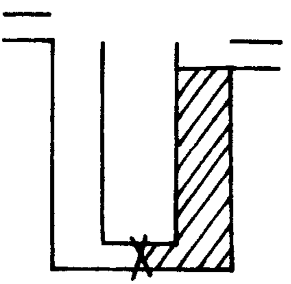
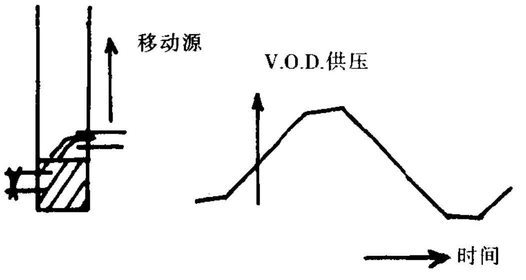


图2

另一种方法是由一个位于水面上方一点的供水装置给容

器注水（图 3），在往容器里注水的时候，及时提升供水装置的位置，这样就能保持在整个供水过程中，供应水下落的落差一直比较小。同样，我们在容器中水面下方一点的地方设一个出水管，只把接近顶部的一些水放掉，并且在放水过程中降低水管的位置。这样的话，在晶体管所在的位置就不会有能量损失，或者损失很小。实际能耗的大小取决于注水时供水装置与水面的距离。这种方法要求随时改变电压供应；因此，如果我们能够有一个随时变化的电压供应，我们就可以采用这种方法。当然，供电中也有能量损失，但是电压供应装置是固定在某个地方的，在那个地方产生一个大电感是很简单的事。人们称这个计划叫“热钟”，因为供压装置是和计时钟同步工作的。另外，这里不像传统设计中那样需要一个时钟信号为电路记时。



可变电压供应
（“热钟”）
能耗・时间＝恒量

图 3

如果运转慢一些的话，后两种方案都只需要比较少的能量。因为如果我让供水位置移动太快，管子里的水跟不上，

结果水位就会有个大的落差。所以为了保证这种设计有效，我必须让机器运转得慢一些。与此相似，在 U 形管方案中，只有中央阀门开关的速度比 U 形管里水前后滑动所需的时间快一些，这个设计才会有效。所以在我的设计中，机器必须慢一些——节约了能耗，但是减慢了机器的速度。实际上，能耗乘以电路启动所需时间，结果是个恒量。但是尽管如此，这个方案其实是很实际的，因为时钟时间通常要比晶体管的电路时间大得多，我们可以利用这一点来减少能量。同样，如果我们的计算速度减慢——比如说——三倍，那么在三倍长的时间里我们就可以只用三分之一的能量，这是（传统模式中）所需消耗功率的九分之一。也许这是值得的。为了制造一个实用而又可以减少能耗的大机器，也许我们可以通过重新设计，使用平行计算或其他装置，这样我们就可以比在最大循环速度时多用一点时间。

对于晶体管来说，能耗与其启动时间的乘积决定于下面几个因素（图 4）：

能量 · 晶体管时间

$$=kT\cdot\frac{\text{长度}}{\text{热速度}}\cdot\frac{\text{长度}}{\text{平均自由程}}\cdot\text{电子数}$$

能量 ~ $10^{9\text{-}11}kT$

∴减小尺度：快

能量少

（图 4）

1. 与温度成比例的热能，kT；

2. 进出之间的晶体管长度除以其中电子的速度（热速度 $\sqrt{3kT/m}$）；

3. 晶体管长度，以晶体管中电子碰撞的平均自由程为单位；

4. 晶体管工作时它里面的电子总数。

把所有这些数字考虑进去，目前的晶体管所消耗的能量在 10 亿至 100 亿或更多倍热能 kT 之间。在晶体管开关时，所耗能量更多。这是一份很大的能量。显然，为节约能量，一个很好的主意是减小晶体管的尺寸。通过减小进出之间的距离，我们可以减少电子的数目，这样就只需用很少的能量了。事实证明，尺度小一些的晶体管运转的速度会更快，因为这时电子可以更快地通过晶体管，从而更快地启动或关闭晶体管。从各个方面来说，制造小尺度的晶体管都是一个很好的选择，大家一直都想向这个方面努力。

但是设想一下我们面临这样的情况：平均自由程比晶体管的尺度还长。我们发现，这种情况下晶体管就不能正常工作了——它不能按照我们所预期的方式工作。这让我想起数年前我们曾经遇到过的所谓声障问题。人们曾认为飞机的速度不可能超过声速，因为如果你按照普通的方式设计飞机，当你把音速代入方程时，你会发现发动机不能工作，机翼不能上举，所有的东西都不能正常工作。然而，飞机的速度其实是可以突破音速的，问题在于你得知道在当时的环境中有什么样的定律，你得照正确的定律去设计它。你不能指望旧的设计适用于新的环境。但是新的设计却可能适应新的环境，我坚信我们完全可能在小于自由程的尺度内制造晶体管

系统，或者，更准确地说，制造开关系统和计算装置。当然，我只是说“原则上”是这样的，我不是在谈论如何实际制造这些设备。所以下面我们来讨论，如果我们想制造尽可能小的装备，情况会是什么样子？

缩小尺寸

因此我的第三个话题就讲讲计算元件的尺寸，当然，我这里完全是在理论上讲这个问题。如果一个东西非常小，你担心的第一个问题可能是布朗运动 *——所有的东西都在颤动，没有什么东西会停在一个地方。那么你怎么控制电路呢？更进一步说，如果一个电路不工作，它会不会有个偶然的机会跳回去？在我们用 2 伏电压为这个电系统提供能量时——这是我们通常的用量（图 5）——这个能量相当于室温下热能的 80 倍（1kT=1/40 瓦特）；相对于 80 倍的热能来说，某个东西跳回去的几率是e^{-80}，或 10^{-43}（e是自然对数的底数）。这是什么意思呢？如果一个计算机中有 10 亿个晶体管（我们现在还没有这样的计算机），一秒钟内它们的总开关次数为 10^{10} 次（一次开关的时间是百亿分之一秒）；如果它们准时开关，运行 10^{9} 秒——相当于 30 年——那么这个机器的开关动作的总数为 10^{28} 次。但是每个晶体管跳回去的机会只有 10^{-43}，也就是说 30 年内都不会出现任何由热运动造成的错误。如果你还不满意，你还可以用 2.5 伏的电压，这时出错的可能性甚至更小。然而，也许远远不到 30 年，

---

* 由于分子持续的随意碰撞而引起粒子的剧烈运动，植物学家罗伯特·布朗于 1928 年的照片中首先注意到了这个现象，爱因斯坦在 1905 年发表于《物理年鉴》的论文中解释了这个现象。——编者

布朗运动

2 伏特＝80kT

出错概率 $e^{-80}=10^{-43}$

——

10^9 个晶体管

10^{10} 次变化 / 秒

10^9 秒（30 年）

——

10^{28}

（图 5）

就会因为宇宙射线偶然穿过晶体管而导致它发生故障，所以在这方面我们就不必考虑得太多了。

然而实际的可能性要大得多，我想推荐给你们最近一期《科学的美国》* 上班尼特（C. H. Bennett）和兰道尔（R. Landauer）合作的一篇论文，《计算的基本物理限制》。我们确实可能造一个计算机，它里面的每一个元件，每一个晶体管可以往前走走然后又意外地逆转，但计算机仍然运转。计算机中的每个操作都可以或往前走或往后走，所以事情往往这样：计算的进程往前推进了一会儿，然后又往回取消自己——“解算”——然后又往前走，等等。如果我们把它往前拖一点点，使它往前走的可能性比往后走的可能性大一点点，我们就可以让这计算机挺过去，完成计算。

人们已经知道，通过把一些简单的元件——比如晶体管，或者更逻辑、更抽象一点地说，比如一种叫 NAND 门的

* 《科学的美国》，1985 年 7 月；日本译本——SAIENSU，1985 年 9 月。——编者

东西（NAND 的意思是“NOT-AND”——放在一起，我们可以完成所有可能的计算。一个 NAND 门有两个进“线”和一个出“线”（图 6）。我们先把“NOT”，放一边——什么是 AND 门呢？AND 门是这样一种装置：只有当两个进“线”都是状态 1 时，它的输出才是 1，其他情况下它的输出都是 0。NOT-AND 的意思正好相反，除非两个输入线状态同时为 1，否则输出线状态都是 1（也就是让电压值为 1）；如果两个输入线状态同时为 1，那么输出线为 0（也就是让电压值为 0）。图 6 显示的一个输入、输出小平台，就是这么一个 NAND 门。A、B 是输入，C 是输出。如果 A 和 B 都是 1，则输出为 0，否则输出为。但是这种装置是不可逆的：信息丢失了。即如果我只知道输出，我就无法复原输入。我们不能指望这种装置往前蹦蹦又回来，然后还能正确计算。比如说，如果我们知道现在的输出为 1，我们就无法判断它是

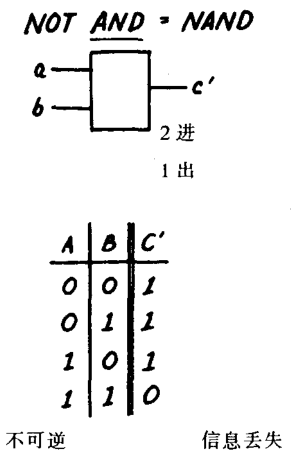
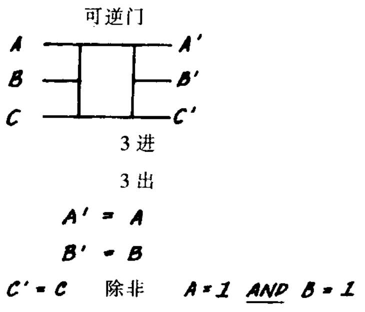


图 6

从 A=0，B=1 来的，还是 A=1，B=0 从或 A=0,B=0 来的，而且它不能返回去。这样的一个装置是个不可逆门。班尼特和菲特肯（Fredkin）各自独立的伟大发现，在于他们发现了用一种不同的基本门位元——也就是一个可逆门——来进行计算的可能。我在前面已经用一个我称之为 NAND 门的位元说明了他们的想法。它有三个输入和三个输出（图 7）。两个输出端 A′和 B′，和两个输入端的 A 和 B 相同。但是第三个输入端是这样工作的：除非 A 和 B 都为 1，否则 C′和 C 相同。在 A 和 B 同为 1 时，不管 C 为什么，C′都要变化。比如，如果 C 为 1，C′就变为 0；如果 C 为 0，C′就变为 1——但是只有当 A 和 B 同为 1 时才有这些变化。如果你把两个这样的门依次排列，你会发现 A 和 B 将顺利通过，而如果 C 在两个门中都不变，那么它就和原先一样。如果 C 变化，它就变化两次，结果也和原先一样。所以这个门能够自



如果 A＝1 且 B＝1，则 C′＝1-C＝NOTC

没有信息丢失

时间

需要一些动力推动计算，使其向主导方向向前

能耗・时间＝恒量

图 7

己逆转，不会丢失信息。也就是说，只要知道输出，你就可以了解输入的情况。

如果一切都往前走，那么一个完全用这种门制造的装置是可以进行计算的。但是如果来来回回走了一会儿，但最终还是有足够的向前走的步骤，它仍然是可以正确运行的。如果它往后蹦了蹦，后来又往前走了，它仍然没问题。这很像气体中受四周原子轰击的一个粒子。通常情况下这个粒子的运动是没有方向的，但是假如你给它施加一点点推力，给它一个小小的导向，使得它在某个方向上运动的机会比在其他方向上运动的机会高一点点，它就会慢慢向前漂移，从一端走向另一端，而不会像以前那样做布朗运动了。所以，倘若我们提供一个动力把它“拉过”运算，我们的计算机就能计算了。尽管它不是以一种流利的方式进行运算，而是这样来来回回地运算，但它最终是能完成运算工作的。就像气体中的粒子，如果我们轻轻地拨它一下，我们只费了很小的能量，但它也就慢慢从一端运动到另一端了，虽然走得很慢。如果我们有点急，我们就用力拨它一下，这时我们耗掉的能量也就比较多。计算机也是如此。如果我们有耐心慢慢走，我们就能够让计算机几乎没有能耗地运行，每一步的能耗甚至不到 kT，如果你有足够的时间，能耗可以降到任意小。但是如果你想快一些，你就必须耗能。在这里，你推动运算向前迈进的能量损耗与你做这个运算所需时间的乘积也同样是一个恒量。

心里记着这些可能性，然后我们再来看我们制造的计算机可以小到什么程度。一个数字必须有多大？我们都知道，我们可以用 2 进制写数字，像一串串“位元”，每个位元非 1 即 0。下一个原子可以是 1 或 0,，这样，一小串原子就足

以保存一个数字，一个原子就是一个位元。（其实，既然每个原子有两个以上的态，所以我们所需的原子甚至可以更少，不过每位一个已经足够小了！）就当是智力游戏，我们来考虑一下，我们是否能够造一台计算机，其书写单元是原子尺度的？比如说，其中的每一个单元原子的自旋是否是向上为 1 向下为 0？在不同地方变着位的晶体管，就相应于原子间的某种相互作用——这种相互作用将改变原子的态。最简单的一个例子是，一种 3-原子相互作用是否能作为这样一台计算机的基本元素或门？同样，我们还要注意，如果我们依据适用于大尺度物体的定律来设计这机器的话，它是不会正确运转的。我们必须运用新的物理定律，适用于描述原子运动的量子力学定律（图 8）

现在必须使用新的物理定律

可逆门

量子力学

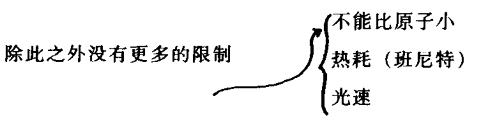


图 8

因此，我们得向下追问：量子力学的原理是否允许我们排列小数目的原子，其数目不过是一台计算机中门数目的数倍而已？——当然，这计算机要能够像一台计算机那样工作。在这方面，人们已经做过理论的研究，而且已经发现了这样的原子排列。既然量子力学定律是可逆的，我们就必须要用班尼特和菲特肯发明的可逆逻辑门。对量子力学状态的

研究表明，对班尼特先生从热力学角度所说的那些问题，量子力学没有什么额外的限制。当然，也有一个限制——总要有实际的限制——即其中的单元必须是一个原子的尺度，一个晶体管的尺度是 3 或 4 个原子。我所用的量子力学门有 3 个原子。（我不考虑把我的位元写到原子核上去，我要等到技术的发展达到原子级之后再往前走！）这要求：（a）尺度限制在原子的尺度；（b）能量需求依赖于班尼特计算出来的时间；（c）我没有提及的一个特别因素，它涉及光速——我们不可能以快于光速的速度发送信号。这是我所知道的对计算机的唯一一个物理限制。

如果我们像着了迷一样，想造一个原子尺寸的计算机，这将意味着（图 9）它的尺度——线性尺度，比我们现在所有的非常小的芯片还要小 1000 至 10000 倍。这意味着计算机的体积只有现在体积的万亿分之一或 10-11，因为那种“晶体管”的体积与我们今天所造晶体管的体积相比，其缩小因子是 10-11。即使它的一个单开关所需能量，也比开今天的晶体管所需的能量小 11 次幂的量级，而且每步运算所需的转换时间至少要快 1 万倍。所以说计算机是有很大的发展空间的，我把这作为一个奋斗的目标留给你们，实际研究计算机的人们。我没想到 Ezawa 先生翻译我的讲话需要这么长的时

线性尺度：10^{-3}~10^{-4}	}	每个门可利用的缩减量
体　　积：10^{-11}		
能　　量：10^{-11}		
时　　间：10^{-45}		
理论上　　可能！		

图 9

间，我今天要讲的都讲完了。谢谢！如果有什么问题，请提出来，我很乐意回答。

提问和回答

问：您提到一个单元信息可以存储在一个原子里，我想知道的是您能否把等量的信息存储在一个夸克里。

答：是。但是我们控制不了夸克，所以这确实不是一个可行的办法。你也许认为我现在所讨论的也不切实际，但我不这么认为。在我谈原子时，我相信某一天我们会有能力单个地处理并控制它们。夸克的相互作用涉及很高的能量，再加上放射性等等原因，所以处理它们是很危险的。但是我现在所说的原子能对我们来说是很熟悉的，我们在化学能、电能里面都碰到它，我相信，这些能量的数量级都在现实范围之内，尽管在目前看来这还显得有点荒唐。

问：您说计算的元件越小越好，但是我觉得设备必须大一些，因为……

答：你的意思是你的手指太大了，按不了那么小的按钮？是这个意思吗？

问：是的。

答：当然，你是对的。我现在说的是内部的计算机，也许是为机器人或其他装置用的。我没有讨论输入和输出的问题，输入的方式或者是看图片，听声音，或者是按钮。我是在原理的层面上讨论我们可以怎样造计算机，而不是讨论该采用哪种形式的输出。毫无疑问，大多数情况下，输入和输出不能猛然缩小到人的尺度之外。现在某些计算机上的按钮，对我们的大手指来说已经太难了。但是那些复杂的、需

要花费数个数个小时的计算问题，它们可以在非常小的机器上很快地完成，而且只消耗很低的能量。我考虑的是这么一种机器。它们处理的是复杂运算，而不是把两个数据进行相加那种简单的应用。

问：我想知道你如何把信息从一个原子级的元件传输到另一个原子级的元件。如果你用的是两个元件之间量子力学的相互作用或自然性的相互作用，那么这样一种装置就和“自然”本身十分接近了。比如，如果我们做一个计算机模拟，一个用来研究临界现象的蒙特卡罗式（Monte Carlo）磁体模拟，那么你的原子级计算机就得和磁体本身很接近。你怎么看这个问题?

答：是的。我们所做的东西都是“自然”。我们以某种方式安排它，是出于我们的目的，我们是为了一个目的而进行这个运算。循着这个思路，如果你愿意，在磁体中可以有某种联系，那儿正在进行某些形式的计算，就像太阳系中那样。但是那也许不是我们目前想要进行的运算。我们所需做的，是这么一种装置，我们可以为之改变程序，让它计算我们想要解决的问题；而不是计算它自身的磁体问题，那是它自己要解决的问题。除非碰巧某人给我的问题是研究行星的运动，否则我不可能为一台计算机而去对付太阳系，在那种情形下，我所能做的只是观察而已。曾经有一篇有趣的文章，是当作笑话来写的。“文章”讨论了在遥远的将来一种进行空气动力学运算的新方法：不必用我们今天这么复杂的计算机，作者发明了一种简单的装置，可以把空气吹过翅膀。（他重新发明了风洞！）

问：我最近在报纸上读到一篇文章，说大脑中神经系统的运转速度比目前的计算机慢得多，而同时神经系统中的单

元却小得多。您觉得你今天所谈的计算机和大脑中的神经系统是不是有些相同？

答：大脑和计算机之间有一点类似，即在它们的里面有些单元显然可以在其他单元的控制下进行转换。神经冲动控制或刺激其他神经，其方式取决于是否有多于一个的冲动进来了——有点像 AND 或这一类的东西。进行一次这样的传输大脑细胞需要用多少能量？我不知道这个数字。但是即使和今天的计算机相比，大脑中完成一次转换所需的时间也要长得多，更不用说某些将来的原子计算机所具有的奇特功能了。但是大脑的内部连接系统远比计算机复杂，它的每个神经元连接着数千个其他神经元，而我们的一个晶体管只连接两三个其他晶体管。

有人着眼于活动中大脑的活跃特性，他们看到，在许多方面大脑胜过今天的计算机，而在另外许多方面计算机又胜过我们。这激励着人们去设计能做得更多的计算机。一般的情形是，工程师对大脑如何工作有了个想法（从他的观点看是这样），然后他就设计一个也这样工作的机器。这种机器也许真的能够工作得很好，但是我得警告你们，这并不是在告诉我们大脑真的如何工作，也不意味着为了制造功能很大的计算机，我们就必须真的要知道大脑如何工作。这就好比说，我们并非一定先要知道鸟如何拍翅膀、如何长羽毛，然后才能制造飞行器；我们并非一定要了解印度豹——一种跑得很快的动物——腿的杠杆系统，然后才能制造出跑得很快的轮式汽车。因此，我们也并非一定要在细节上模仿自然的行为，然后才能设计出在许多方面胜过自然能力的装置。这是一个有趣的话题，我很乐意来谈谈这个话题。

与计算机相比，你的大脑非常脆弱。我给你一串数字，

一，三，七……或者更难一些，ichi，san，shichi，san，ni，go，ni，go，ichi，hachi，ichi，ku，san，go。现在我要你把它们给我复述出来。（你做不到。）然而计算机能够接受成千上万个数字，并且能够倒述出来返还给我，或者把它们加起来，或者对它们做许多我们不能做的事情。另一方面，如果我看一张脸，只要看一眼我就能告诉你他是谁，或者告诉你我认识这个人，还是不认识这个人。但是我们现在还不知道如何设计这么一个计算机系统，在我们给它一张面孔的图案时它能够告诉我们这些信息，尽管它已经看过许多面孔，我们也曾经试图教过它。

另一个有趣的例子，是下棋机器。我们能够造出一个机器，它的棋下得几乎比在座的所有人都好，这很让人惊奇。但是它们是通过尝试许多许多种可能性而做到这一点的。如果它走这儿，那么我可以走这儿，然后它走那儿，等等。它们能看到每一种选择，然后选择最佳的一种。计算机能看到成千上万种选择，而一个国际象棋大师，一个人，就不一样。他认识图案。在决定走哪一步之前，他只看三十或四十个可以走的位置。因此，虽然走棋的规则简单，下棋的机器却走得不是很好，因为每一步都有太多的可能性，有太多的情况需要验证，机器看不到那么深。所以识图的问题，以及这种情况下如何做的问题，对于计算机工程师（他们喜欢称自己为计算机科学家）来说，仍然是非常困难的一件事。对于未来的计算机来说，这当然是一件重要的事情，也许比我说到的事情还要重要。造一个能够“走”得更有效的机器！

问：我觉得，任何计算的方法，除非它能提供一种编写程序的方法，否则不会有多少实际的意义。我曾经认为菲特肯关于保守逻辑的论文很有意思，但是当我想到要用这个机

器写一个简单程序时，我傻住了，因为设计出这么一个程序（写程序的程序）要比所要写的程序复杂得多。我想我们可能很容易就进入一种无穷倒退，因为设计出一个特定程序的过程，会比这程序本身复杂，而如果想要让设计过程自动化，这自动化程序将会更为复杂，如此等等，特别是当这个程序是硬捆绑式而不是像一个软件那样是分离式的时候。

答：我们俩的经验不同。没有什么无穷的倒退：复杂性会止步于某个程度。就其可以接受我们的程序安排去做各种各样的工作而言，菲特肯最终讨论的机器和我刚才讨论的机器都是通用的计算机。这不是一个硬捆绑程序。它们捆绑的程度并不比普通的计算机高，在普通计算机上，你可以输入信息——程序也是输入的一部分——然后机器就做你设定要做的问题。它是捆绑式的，但是和普通的计算机一样，是通用的。这些事情还很不确定，但是我发现了一个运算法则。如果你为一个不可逆的机器写了一个普通程序，那么我就能够用一个直接的翻译方案把它转变成一个可逆机器程序，不过我所用的翻译方案效率很低，需要许多许多步骤。然而在实际情形中，步骤可以少得多。但是至少我知道，我可以把不可逆机器上的一个 $2n$ 步骤程序，转变为可逆机器的一个 $3n$ 步骤程序。这个步骤要多得多了。因为我没有想去找实现这个转变的最少步骤，所以我完成这个转变的效率是很低的——这只是完成这个转变的一种方法而已。我确实不认为我们会遇到你所说的那个倒退，但是也许你是对的，我不能肯定。

问：既然那些可逆机器运转得这么慢，我们将牺牲许多我们原本希望这种装置所能有的优点吧？对这一点我非常悲观。

答：它们运行慢一些，但是它们很小。除非需要，一般情况下我不让它可逆。因为在能耗为 80 倍 kT 时，不可逆机器就已经能发挥得很完美了，所以没有必要让机器可逆，除非你是特别想大规模地，准确地说，是疯狂地降低能耗。与目前的 10^9kT 或 $10^{10}kT$ 相比，$80kT$ 要小得多，所以在能量方面我至少还有 10 的 7 次幂改进空间，所以我仍然可以用不可逆机器来做！这是真的。目前来讲，这是个正确的途径。我只是为了智力游戏，才去追问从原理上讲——不是在实践中——我们可以走多远，结果我发现我可以达到一个 kT 能量的几分之一，我可以把机器造得极微小，小到原子的量级。但是这么做，我就必须要用可逆物理定律。之所以会出现不可逆性，是因为热量扩散到了大量原子上而且收拢不回来。当我把机器做得非常小的时候——除了冷却元件，它得有许多原子——我不得不用可逆方式工作。在实践中，也许永远不会有那么一天，我们不愿意把一个小计算机绑到一大片有 10^{10} 个原子的石墨上（实际上这还是非常小的），使它特别地不可逆。因此，我同意你的看法，在实践中，很长时期内，也许是永远，我们都将使用不可逆门。但是另一方面，力图在各个方向上找到其边限，把人类的想象尽可能地往每一个地方伸展，这是科学探险的一个部分。尽管在各个时期，这种活动都被认为是荒唐而且无益的，但是结果常常证明它至少并非无益。

问：测不准原理对此有限制吗？在你的可逆机器方案里，能量和钟时有没有一些基本的限制？

答：那确实是我的要害。这里没有来自量子力学的特别限制。你一定要仔细区分两种能量：一是消耗或者丢失的能量，机器在工作过程中产生的热量，这是不可逆的；一是包

含在运动部件中的能量，这是可以再次被吸取的。在时间和可以被再次吸取的能量之间，有一个联系。但是那种可以被再次吸取的能量没有什么意义，或者说我们不必关注它，好比是问我们要不要加上静止能量，即装置中所有原子的 mc^2 我只说到能耗乘以时间，所以这里没有什么限制。不过，如果你想在某个超高速上进行一个运算的话，你就得给机器配备运动快而且有能量的部分，这是没有疑问的。但是这能量并非在运算的每一步上都要有损失，它可以靠惯性运行下去。

答（没有问）：关于“没有用”这个问题，请允许我说几句，我想再补充一点。我在等着你们问我这个问题，但你们没有问，所以我自动来回答这个问题。我们为什么要造这么小尺度的一个机器，以至于我们得把原子安置在某些特定的位置？虽然我们现在还没有这样的机器，它的运动部分的尺寸出奇的小，甚至只有几个或几百个原子的尺度，但是在这个发展方向上也没有什么物理的限制。即使在我们已经放弃了硅的今天，我们也没有理由不把它们做成一个个独立的小东西，以便它们可以活动。我们还可以安排小喷嘴，在特定的区域喷上不同的化学材料。我们能制造超小的机器，这些机械很容易用我们造的同类计算机线路来控制。最后，还是为了好玩，为了智力上的愉悦，我们可以想象只有几个微米大小的机器，所有的轮子和电缆都通过电线和硅结相互连接，于是这东西就成为一个整体，一个很大的装置，它动起来不像我们目前僵硬的机器那么笨拙，而像天鹅脖子一样灵活——天鹅脖子毕竟也是许多小机器构成的，细胞之间相互联系，一切都控制得很好。为什么我们自己做不到呢？

3　洛斯-阿拉莫斯，从底层开始

这里是一些轻松的小故事——那个在洛斯-阿拉莫斯陷入麻烦又走出麻烦的费曼，妙语连珠的费曼（更不用说那个保险柜克星的费曼）：假装违反“男人宿舍女子禁入”的规定而得到了自己的私人空间；智胜营地检察官；与奥本海默、波尔、贝蒂等伟人磨肩接踵；因为是唯一一个不带护目镜而直视第一颗原子弹爆炸的人，他获得了令人敬畏的殊荣，这一经历永远地改变了费曼。

Hirschfelder教授的介绍真是过誉了，和我的讲演殊不相称。我讲演的题目是“洛斯-阿拉莫斯，从底层开始”。我所谓“从底层开始”的意思是，虽然我现在在这个领域内小有名气，但在那时我根本还只是个无名之辈。当我开始从事与曼哈顿计划[*]相关的研究时，我甚至连学位还没有拿到。其他许多向你谈起洛斯-阿拉莫斯的人，都认识政府机构的一些高层人员什么的，他们是些考虑大决策的人。我不考虑什么大决策，我总是在底层某个地方忙来忙去。当然，我也不是在最底层，正如大家所知，我往上升了几步；但是我不属于高层。所以我希望你们换一个角度来看待我，不要像介绍人说的那样。你只需想象这个年轻的研究生还没有拿到学位，他正在进行他的博士研究。我要从我如何加入那计划说起，说说我做了些什么事。这就是我要讲的内容——我在那工程中到底做了些什么。

有一天，我正在我的办公室[**]工作，鲍勃·威尔逊[***]走了进来。我正在工作——（笑声）怎么，我很滑稽吗？你们笑什么？——鲍勃·威尔逊进来说他已经被任命去做一项秘密的工作，他不想告诉任何人，但他要告诉我，因为他知道，一旦我知道他要做什么，我就明白我不得不加入进去了。于是他告诉我他们要分离铀的不同同位素。他最终必须造出一个炸弹，然而因为用目前的工艺所分离出来的铀同位

* 研制第一颗原子弹的庞大计划被命名为“曼哈顿计划”，这个计划开始于1924年，而以1945年8月6日和9日分别在广岛和长崎爆炸两颗原子弹为结束。曼哈顿计划的单位遍布美国，比如：芝加哥大学；哈佛大学，华盛顿州；欧克里奇，田纳西州；洛斯-阿拉莫斯，新墨西哥州，原子弹就是在这儿制造的，这儿实际上也是整个计划的司令部。——编者

** 当时费曼在普林斯顿大学。——译者

*** Robert R. Wilson（1914~），费米国家加速器实验室的第一任主任，1967~1978。——编者

素，与最终所需的铀同位素不一样，所以他想改进分离铀同位素的工艺。他告诉我这些，又说将有个会议……我说我不想做这事。他说，没关系，三点钟有个会，到时见。我说，你告诉这个秘密也没关系，因为我不会告诉其他人，但是我不会去做那工作。于是我转身回去做我自己的论文。大概也就三分钟吧，我又开始在屋里踱起步来，考虑鲍勃所说的事。德国人有个希特勒，显然有发展原子弹的可能，他们可能在我们之前发展出原子弹，这太可怕了。所以我决定去参加三点钟的会议。四点钟的时候，我已经在一间房子里有了张办公桌，并开始计算这种特殊的方法是否受限于从离子束得来的总流量等等这类问题。我不打算介绍那些细节。总之，我有张办公桌，有稿纸，我尽我所能努力工作。制造仪器设备的同事们打算就在这儿进行实验。就像在动画片里一样，你看到一套设备在卟卟卟地生长，我每次抬头，它都变大了一些。当时的情况自然是所有年轻人都决定停下他们的科学研究而来从事这个工作。在战时，除了洛斯-阿拉莫斯所做的这一点点工作之外，所有的科学研究都中断了。而洛斯-阿拉莫斯所做的，其实没有多少科学，大量的工作都是工程技术。他们把自己原来的研究设备搬来，把所有不同研究的设备汇在一起来造一个分离铀同位素的新装置。我也因为这个相同的原因而中断了自己的研究。确实，其后不久我曾请了 6 个星期的假，以完成博士论文的写作。所以，我在去洛斯-阿拉莫斯的前夕，正好拿到了学位，所以我也并不是真的像我一开始向你们暗示的那样落魄。

在普林斯顿的这个项目中，我的第一个经验是结识伟人，我觉得这很有意思，此前我还从未接触过这么多伟大的人物。那儿有个评估委员会，由他们来决定我们该采取哪一

种方案，并向我们提供帮助，他们帮助我们最终确定用何种方法分离铀元素。这个委员会中有托尔曼（Tolman），史密斯（Smyth），尤里（Urey），拉比（Rabi）和奥本海默（Oppenheimer）等人。比如康普顿（Compton）也在其中。有一件事让我很震惊。因为我懂得正在进行的工序的理论，所以我也参加会议，他们会问我问题，然后我们就那问题进行讨论。这时某个人可能会提出一个观点，然后，比如康普顿，会提出并阐明另一个不同的观点，他的观点往往很正确，这是正确的观点，他说应该“这样”。而另外一个人会说，也许我们得考虑一下与康普顿观点相左的可能。我们得考虑另一种可能。我快跳起来了！他，康普顿，他应该再说一遍，他应该再说一遍！你看，每个人的看法都不同，大家围着桌子争论。最后，坐在桌子顶头的委员会主席托尔曼说，好，听了所有这些讨论，我想康普顿的意见确实是最好的，我们得讨论下一个问题了。这情景太让我震惊了，委员会能提出许许多多观点，每个人都想到一个新的方面，每个人都记得别人说了些什么，每个人都在倾听别人的想法，最后得出结论，确定哪一个想法最好——把所有意见归纳起来而无须颠三倒四地唠叨，这太让人吃惊了，他们确实是些非常伟大的人。

最终的决定是：这个项目的目的，不仅仅是要分离铀。我们得到通知，停止在普林斯顿的工作而启动在洛斯-阿拉莫斯、新墨西哥州的项目，也就是说真的要制造炸弹了，我们都得到那里去造炸弹。我们有些实验需要做，也有些理论工作需要做。我负责理论方面的工作，其他人全部去做实验方面的工作。接下来的问题是：做什么？我们奉命转变方向，但是洛斯-阿拉莫斯方面还没有准备好，所以时间上就

有了个脱节。鲍勃想让我利用这段时间去芝加哥，尽可能地了解炸弹及其相关问题，以便我们可以在自己的实验室里先开始建造些设备，比如各种各样的计算器等等，到我们去洛斯-阿拉莫斯时，这些东西会派上用场。我被派到芝加哥去，任务是走访每个小组，告诉他们我将和他们共同工作，要他们尽可能详细地告诉我他们遇到的问题。我需要了解足够的细节，以便我能够坐下来研究、解决这问题。在我了解了一个问题的细节之后，我就去找另一个人，问另一个问题。通过这种方法，我可以弄明白每件事的细节。尽管我的良心稍有不安，但这确实是个很好的主意。有一次（我很幸运），有个人告诉我他遇到的一个问题，我对他说，你为什么不用另一种方法呢？照我的建议，半小时后，他就把问题解决了——他们已经被这个问题困扰了 3 个月！所以，你看，我确实做了点事。从芝加哥回来后，我给同事们做了个报告：有多少能量释放出来？这炸弹将是什么样的？等等。我记得我的一位朋友，保罗·奥卢姆（Paul Olum），他是个数学家，和我同事，在我讲完后他走过来对我说："如果他们拍关于这件事的电影，在电影里他们会安排一个情节，让这个从芝加哥回来的人向普林斯顿的人讲述关于炸弹的一切，他穿着西装，夹着公文包——可实际上你是穿着脏脏的短袖衫来报告我们这些事情的。"但无论如何这是件十分严肃的事，所以保罗觉得现实和电影里的差距很有趣。

看起来还得有些耽搁，于是威尔逊就去洛斯-阿拉莫斯，他想知道是什么事情被卡住了，他们的进展如何。他到那儿一看，建筑公司正在奋力工作，已经建成了一个剧院及其他几个建筑，因为他们知道怎么建这些东西。但是没有人清楚地教导他们怎样建一个实验室——要装多少汽管子，多少水

管子——于是他就站在边上，现场决定装多少汽管子，装多少水管子等等，要求他们开始动工建实验室。然后他又回来——你知道，我们都准备好动身了——而奥本海默在和格罗夫斯（Groves）讨论问题时遇到了些困难，我们越来越不耐烦。直到我从我自己所处的位置理解了那问题，威尔逊才打电话给芝加哥的曼利（Manley）。他们会合后决定，即使那儿还没准备好，无论如何我们都该到洛斯-阿拉莫斯去了。于是，我们都在洛斯-阿拉莫斯准备好之前到了那儿。顺便说一句，是奥本海默和其他一些人使我们恢复了精神，他对每个人都很耐心，他留心每个人的问题。他担心我的妻子，她有肺结核，他关心那里是否有医院等各种各样的事。这是我首次和他有这种私人的接触，他是那么好的一个人。他们还提醒我们在其他一些事情上要小心，比如，不要在普林斯顿买火车票，因为普林斯顿是个很小的站，如果大家都买去新墨西哥阿布圭基*的票，别人就会怀疑有什么事了。最后，大家分散开来，从其他地方去阿布圭基，只有我在普林斯顿买了票，因为我想，如果每个人都去其他地方买票的话……当我去火车站，说我要去新墨西哥州的阿布圭基时，售票员说，噢，原来那些东西都是托运给你的。此前我们已经化了好几个礼拜的时间托运那些装满计算器的柳条箱，原本希望他们不要注意到那地址是阿布圭基的。所以，至少说解释了为什么要托运柳条箱——我动身去阿布圭基了。

我们还是去早了。我们到的时候，宿舍之类的还没有准备好。实际上，实验室也没有完全准备好。我们的提前到来，推着他们往前赶，我们是在催着他们。这真把他们逼疯

* Albuquerque，美国新墨西哥州中部的一个城市。——译者

了，为了安置我们，他们把周围农场的房子全租了下来。我们起先就住在一个低矮的农舍里，早晨驾车去上班。驾车上班的第一个早晨，印象极其深刻，那美丽的景色，对一个来自东部，又没有怎么旅行过的人来说，太令人感动了。那些壮观的悬崖绝壁，在高高的平顶山侧，你得从下面爬上去看这些壮观的峭壁——我们都惊呆了。我印象最深的一件事是，往上走的时候，我说，这里也许住着印第安人吧？驾车的那个人就停下来……他停下车，绕着一个角落走了一圈，真的发现了印第安洞，而且可以进去看。所以，在从这方面来说，那段经历真的让人非常兴奋。

我第一次到那儿时，在大门口我看到——你知道，这里是技术区，按计划要有个围墙把它彻底围起来，但是因为还在施工，所以仍然开放着；另外，按照计划，这里要建成个镇子，一个大围墙绕着镇子延伸出去——我在大门口看见了我的朋友，保罗·奥卢姆，他是我的助手，这时他正站在大门口，手里拿着记事板，检查进进出出的卡车，指挥它们把材料运送到不同的地方。我若走进实验室，我该会见到一些曾经耳闻其名的人，我在《物理评论》上读过他们的论文，但从未谋过面。他们说："这是琼·威廉斯。"一个人从铺着设计图的办公桌后起身走过来，他挽着袖子，站在窗边，指挥着往不同方向跑的卡车等去进行建筑。也就是说，是我们在料理着建筑公司，是我们在完成建筑的工作。一开始的时候，物理学家们，特别是实验物理学家，在他们的实验室楼和试验设备准备好之前，无事可做，所以他们只得去建房子，或协助建房子。理论物理学家就不同了，因为他们不必依赖于实验室，所以可以立即投入工作。这决定了他们不能呆在农舍里，而是要就位工作。所以我们立即投入工作，当

然，这意味着我们每个人都得有块移动黑板，那种有轮子的、可以推来推去的黑板。我们推着黑板走来走去——塞伯尔（Serber）要讲解他们在伯克利所做的关于原子弹的所有思考；核物理学家们也要讲他们的那些事，所有这些事。我对这些东西懂得不多，我此前所做的是另一类的事。所以我有太多太多的工作要做，每天我都要学习，阅读，学习，阅读，那真是一段极兴奋极疯狂的日子。我有点幸运。那时除了贝蒂，所有其他大人物都因为一些突发的事不得不暂时离开了，比如魏斯考珀夫（Weisskopf）不得不回麻省理工学院处理一些事，特勒（Teller）也在那时离开了。而贝蒂需要有个人和他讨论，从反面推动他的思想。在一间办公室里，他思路焕发，开始争论，解释他的想法。我说："不对，不对，你疯了。应该是这样子的。"他说："等会儿……"于是他又解释说他没有疯，而是我疯了。我们就这么争论。事实证明——你知道，一谈起物理，我就只想到物理，而不考虑谈话的对象是谁，我会说，不，不，你错了，你真是疯了——事实证明，这样的争论正是他所需要的，我也因此而得了点分，最后我成了贝蒂领导之下的一个小组的领头人，手下有四个人。

和贝蒂在一起，我有许多有趣的经历。他第一天来的时候，我们正好有了个加法器，那种手动的商务加法器。他就说，"我们来看看，压强"——他刚刚得出的一个公式涉及压强的平方——"压强，48；48 的平方……"我伸手去拿那机器；他说大约是 2300。于是我把它抽出来，想看看最终的答案。他说，"你想知道准确的答案？是 2304"我问他怎么算出来的，他说："你不知道怎么算 50 左右的平方吗？假如一个数字靠近 50，比如说比 50 小 3，47。47 的平方，

前两位是比 25 小 3 的数，即 22。剩下的是 3 的平方，9。所以 47 的平方就是 2209。很妙吧？”我们继续工作（他数学很好），不一会儿，我们又要求 $2\frac{1}{2}$ 的立方根。我们有个求立方根的小图表，上面有一些三角形数，你可以在商务公司提供给我们的加法器上进行试验。于是（你知道，求立方根他要多用点时间）我打开抽屉，拿出立方根表……他说“1.35”。我还以为他有某种求接近于 $2\frac{1}{2}$ 的数字的立方根的方法，但是实际上没有。我说：“你怎么求的？”他说：“噢，”他说“你知道 2.5 的对数是某某；你把它除以 3，得到某某的立方根。那么，1.3 的对数是这个，1.4 的对数是……我插入它们之间。”我没有用 3 除任何东西，更少……所以你看，他懂得所有这些算法，他特别擅长于此，这是我遇到的一个挑战。我坚持练习。我们常常搞一点小竞赛。每次我们不得不计算什么时，我们就冲向答案，他和我，然后我也可能胜出。数年之后我开始能够做到了，要知道，一旦你到达那一步，也许就可以 4 次胜 1 次了。你当然会注意到关于数字相似的一些趣事，比如你要把 174 乘以 140。你注意，173 乘以 141，近似于 3 的平方根乘以 2 的平方根，这是 6 的平方根，就是 245。但是你得注意数字，而且每个人注意数字的方式是不同的——我们从中得到了许多乐趣。

我刚才说过，初到那儿时我们没有宿舍，但理论物理学家又不得不就地工作。安排我们住的第一个地方是个旧校舍，是从男校租来的，那个学校以前就在那儿。我住的第一个地方是所谓的“机械会所”，里面塞满了双层床。宿舍安

排得不是很好，鲍勃·克里斯蒂（Bob Christie）和他妻子每天早晨都要经过我们卧室去洗澡间，很不舒服。

我们搬往的第二个住处，是个叫“大房子”的建筑，其二层的外围有一圈露台，所有的床一个接一个沿墙排着。在楼下则有个大表格，上面写着你的床号，以及你该在哪个洗澡间换衣服。我的名字下写着“洗澡间 C”，但是没有床号！这让我很恼火。最后，宿舍终于建好了，我去那儿领取分配到的房间，他们说，你现在就可以挑你要的房间。我选了个房间，你可以想见我选了个什么样的房间——我先看看哪儿是女孩子的宿舍，然后选了间房，从里面可以透视女孩子的宿舍。后来我才发现，那间屋的正前方长着一棵大树。总之，我选了那个房间。他们告诉我，暂时需要两个人住一间——不过只是暂时的——每两个房间合用一个洗澡间。房间里用的是双层床。但我不喜欢两个人同住一个房间。我刚到的第一个晚上，那房间里还没有人人住。其时我妻子因肺病留在阿布圭基，她的几箱行李在我这儿。我打开其中的一个箱子，拿出一件小睡衣，随意地扔在上铺。我又拿出拖鞋，并在洗澡间的地板上洒了些香粉。我的目的是让人觉得这间房里除我之外还有其他人。呵？如果另一个床也已被占，就不会再有人想睡进来了。呵？你看结果会怎么？因为这里是男人的宿舍！晚上我回到家，我的睡衣已由佣人细心地叠好，压在枕头下面，拖鞋则细心地摆到了床底下。女睡衣也细心地叠好放在枕头下，床都收拾整洁了，拖鞋整齐地放在下面。洗澡间地上的香粉清扫得干干净净——最重要的是，没有其他人睡在里面，我仍然独自拥有这房间。接下来的一夜，情形依旧。早晨醒来，我把上铺弄乱，女睡衣扔在上面，香粉撒在洗澡间等等，这些小诡计连续进行了四夜，

直到安顿下来为止。每个人都安顿下来了，再没有安排第二个人住进我房间的危险了。每夜，所有的东西都收拾得整整齐齐，一切无误——即使男人的宿舍也总是那么整洁。那种形势下，情况就是这样。

因为那儿有个叫“镇委会”的组织，我因此稍稍卷进了政治。这个镇如何运行之类的事，显然须由军方的人来决定，而由当地的一个管理委员会协助管理。对那个管委会我一无所知，但是像所有的政治机构一样，这里也有各种激动人心的事。特别是这里有许多团体：家庭妇女会，技工会，技术会，等等。那么，单身汉和单身女人，这些住在宿舍里的人们，觉得他们也得有个团体来表达他们的意见，因为这里颁布了一些新规——比如，女人禁入男人宿舍。这太荒唐了，大家都是成年人（哈哈）！怎么有这么愚蠢的规定？所以我们不得不采取政治行动。于是我们决定就此事举行讨论，我被推选为宿舍人的代表，进入了镇委会。

在我进入镇委会一年或一年半后，我和贝蒂谈了些事，他一直在管理委员会高层任职。我告诉他那个故事，即我曾用我妻子的衣物在上铺设骗局的事。他一听就大笑起来，说“哈，这就是你怎么进的镇委会了。”因为那事情的结果就是这样。有人送上了个报告，十分严肃的报告。可怜的女佣惊得发抖，她打扫宿舍房间时，一开门就发现出了大问题——有人和这里的一个男人睡觉！她被惊呆了，不知道如何是好。她往上汇报，清洁工向清洁工的头头汇报，头头向中尉汇报，中尉向少校汇报，一路汇报上去，到将军，到领导层——他们该怎么办？——他们不得不考虑这事。于是，与此同时，一道指令从上往下传达，从上校传到少校，到中尉，到女清洁工的头头，直到那个清洁工——“把东西放回

原处，整理好”，继续观察。呵？第二天，汇报——同样的事，邦，邦，邦……那四天他们为这事伤透了脑筋，该怎么办呢？最后他们颁布了一项纪律，“女人禁入男人宿舍！”这条禁令引起下面的一片抱怨声，迫使他们不得不参与所有政治活动，选出某个人来代表他们。

接下来我要向你说说我们那时的审查制度。他们决定要做一件完全非法的事，对美利坚共和国内人民的信件实施检查。但在美利坚大陆，他们其实无权这么做，因此他们在建立起这个审查制度时不得不非常小心，把它弄成像是自愿的。我们都将自愿地不封信封，我们同意他们拆看我们的来信，没关系，这是我们自愿的。至于我们寄出的信，我们先敞着信封，交由他们检查，如果没问题，他们会代我们封上；如果他们认为有问题，也就是说他们发现了我们不能寄出的内容，他们就把信退回来，附一个便条，说“以我们的观点看，信中某个段落违规了”，诸如此类。这样，非常谨慎地，在所有这些有着自由的心灵而又接受审查的主张的科学家中，我们终于把审查制度建立起来了。当然还有许多相配套的章程——比如，如果我们愿意，我们有权评论制度的执行情况——据此我们可以写信给我们的议员，告诉他我们不喜欢某些运作方式，告诉他我们不喜欢某种事。于是，审查制度完全建立起来了，他们保证遇到什么事情时会知会我们。

这样的日子开始了。执行审查制度的第一天，电话！叮……！我——“什么？”“请下楼。”我来到楼下。“这是什么？”这是我父亲的来信。“那，这又是什么？”这是画着线条的纸，延伸着的线条带着点点——四个点在下，一个点在

上，两个点在下，一个点在上，点下有点。“这是什么？”我说，“这是密码。”他们说，“是的，这是密码。但它表达的是什么意思呢？”我说，“我不知道它的意思。”他们说，“那么，解码是什么？你怎么破译这些密码？”我说，“不知道。”他们接着又问，“这是什么？”我说，“这是我夫人的来信。”“上面写着 TJXYWZ TW1X3，什么意思？”我说，“这是另一种密码。”“解码呢？”“我不知道。”他们说，“你接受密码，却不知道解码？”“确实如此，”我说，“我在玩游戏。我让他们用我不能破译的密码给我写信。明白吗？他们就在那边创造了这些密码寄来了。他们没打算告诉我解码。”审查制度中有一条规定，不干预你信中所有的日常事务。最后他们说，“那么，你必须告诉他们，请他们把解码随信寄过来。”我说，“我不想知道解码！”他们说，“没关系，我们替你把密码抽掉。”我们就此达成协议。呵？好。第二天，我收到我夫人的一封信，信中说“这信很难写，因为我感到有一双无形的眼睛从背后监视着我。”而且那点子上，有个精致的消除污迹，那是墨水消除液留下的。于是我到管理局去，我说，“你们无权碰我的来信，如果你们不喜欢，你们可以告诉我，但你们不能动它。你们只能看，而无权拿掉什么。”他们说，“别傻了，你以为这是检查员的检查方法？用墨水消除液？他们若要去掉什么，会用剪刀。”我说，“好。”于是我写封回信去问我妻子：“你在信中用墨水消除液了吗？”她回信说，“没有，我的信中没有用墨水消除液；那肯定是——，”这里被剪了个洞。我又去找那个负责的家伙，负责这些事的少校，向他抱怨。这事持续了好几天。我觉得我是这样一种代表，我要去把事情弄明白。他试图向我解释，检查员们已经受过怎么做工作的培训，不过他们没有

理解这种新方法，他们没有认识到必须谨慎地看待这新方法。我想站在前列，成为这方面最有经验的一个人，毕竟我和妻子每天都有信件往来。少校说，“怎么了？你认为我没有诚心，没有善意吗？”我说，“是，你有完美的善意，但是我并不认为你有这个权利。”因为，你知道，这事已持续三四天了。他说，“我们就看看这件事！”他抓起电话……一切都弄清楚了。从此再没有信被剪掉这样的事情发生。

虽说如此，但是仍然由此引起了一系列的困难。例如，有一天我收到夫人的一封来信和一张检查员的便条。便条说信中有一个密码，因为没有附解码，所以他们把密码截留下了。后来我去阿布圭基看望妻子，她问我：“哎，那些东西呢？”“什么东西？”她说：“杀虫剂，甘油，热狗，要洗的衣服。”我说：“等等，那是张清单？”她说：“是呀。”“那是‘密码’。”我说。他们把那清单当成密码了——杀虫剂，甘油，如此之类。又有一天，我四处闲逛——开始的几个星期都是这样，因为我们需要几个星期的时间彼此熟悉——我琢磨着加法器，那个计算的机器，注意到了一些事情。于是每天写，我有许多事情要写——这很奇怪。请注意下面的事：如果你用 1 除以 273*，结果是 0.004115226337，非常精确。但是如果你只取三位数，它就显得有点怪怪的了，然后你可以看到 10 10 103 如何真正等同于有一次的 114，或又一次的 115，这样继续发展下去。我是在解释，它经过两次循环之后又那么完美地重复自身。我觉得这有点逗。我把它投进邮箱，但被退了回来。它没有能通过审查，一起退回来的，还有张小纸条：“请看章程第 17 段B。”我翻到章程第 17 段

* 应该是 243，$\frac{1}{243}$=0.004115226337448559……——译者

B，上面说“信件只能用英语、俄语、西班牙语、葡萄牙语、拉丁语、德语等语言写，用其他语言写信需要授权。”接下来又说“不准用密码。”于是我在信中加了个小便条，寄回给检查员，向他说明我觉得那当然不能算是密码，因为你果真用 273 去除 1 的话，结果确实是——我写得清清楚楚，所以数字 273 和数字 1-1-1-1——0，0，0 一样，都不包含什么信息，如此等等。我因此请求他们允许我用阿拉伯数字写信，我喜欢在信中用阿拉伯数字。结果我成功地把事情摆平了。

来来往往的信件，总会遇到些麻烦。有段时间我夫人反复抱怨，说写信的时候总觉得那检查员就在背后监视着她，这种感觉让她很不自在。按规定，我们不允许提及审查制度——我们不能，但是，他们又怎能对她下命令呢？所以他们就不断给我便条，“你夫人又说到审查制度了。”确实，我夫人是说及审查制度了。最后他们给了我便条说，“请知会你夫人不要在信中提及审查制度。”我于是取了纸回信，“他们要求我明告你不要在信中提及审查制度。”嘣，嘣，我的回信被直接打了回来。我回条子给他们，“是你们要求我告知她不要提及审查制度！我究竟要怎么做？再说，我为什么要教导她不要提及审查制度？你们向我隐瞒了什么？”很有意思，审查员自己不得不告诉我，让我告诉我夫人不要告诉我她在……但他们有他们的理由。是的，他们说他们担心信件在从阿布圭基过来的路上被截取；如果有人看了信的内容，会觉察到我们这里有审查制度，所以要请她表现得正常一些。因此，后来我去阿布圭基，我就和她说，“以后我们就不要提及审查制度吧。”但是我们招致的麻烦已实在太多了，所以我们最后发明了一种暗号，一种非法的暗号。我们

约定：如若我在我的签名的末尾加了个点，这意味着我又有麻烦了，那她就转移到设计好的下一个步骤。她会整天坐在那里，因为她在病中，而且要思虑要做的事。她做的最后一件事，是寄给我一个广告——她以为这是完全合法的——广告说，“用拼图玩具给你男友写封信。这是空白的拼图。我们卖给你空白的拼图，你把信写在上面，然后把拼图全拆开，放在一个袋子里寄出。”我收到了这封信，还附着张便条，便条上说，“我们实在没时间玩游戏，请通知你夫人约束自己只写日常的信！”哈哈，其实我们早已准备好又一个“点”了。下封信将这样开头：“希望你记着，开启这封信时小心一些，我已经照计划在里面夹寄了给你治胃病的消化-碱式水杨酸铋（Pepto-Bismol）”其实这封信里装满了粉末，我们希望他们在办公室里一下子打开它，粉末将撒满地板，搞得他们手忙脚乱。因为你无权损坏我寄的东西，所以你得把洒落的消化-碱式水杨酸铋全部收集起来……不过，我们没必要非得做这种恶作剧。呵？

因为有和检查员打交道的这些经验，所以我能准确地判断什么样的信能通过检查，什么样的信不能通过检查，这方面谁也没有我了解得好。我还用这资本和人打赌赢了点钱。有一天，在外围栏，我发现住在外面的工人懒得绕过去从大进来，他们在远处的围栏上挖了个洞，以便进出。我于是从大门出去，绕到那个洞，从洞钻进来，然后又从大门出去，如此反复来去，直到那个家伙，那个守大门的中士开始迷惑：怎么回事？怎么总见这人往外走，却从未见他进来？当然，这中士的习惯反应是呼叫中尉，准备把我投进监狱。我向他们解释，“墙上有个洞。”你知道，我总喜欢给人指点迷津，我告诉他们那儿有个可以溜进溜出的洞。然后我和一

个人打赌，我打赌我可以在信中说围栏上哪儿有个洞，并能把这信寄出去。我确实做到了。我的方法是，我在信中说——“你可以明白他们如何管理这地方”；你知道，这是我们准许说的。“离某个地方英尺处，围栏上有个洞，洞的大小如此这般，你可以穿过去。”好，他们能怎样？他们不能对我说这儿没有那么个洞。我的意思是，他们该做什么？那儿确实有个洞，这是他们自己的倒霉事，他们应该把洞补上！我就这样把信折腾出去了。我还寄出过一封信，信中谈到在我组里工作的一个男孩如何深更半夜被军中的那些白痴叫醒，在灯前接受严厉盘问，因为他们查出了他父亲的一些事或其他什么事。我不知道具体的情况，他们怀疑他是共产党。他的名字叫卡门（Kamane），现在是个名人了。

当然，还有些其他的事。我总是想方设法把一些事点拨出来，就像指出围栏上有个洞一样，不过我习惯上总以一种不直接的方式指出这些事。我想指点的事情之一是：一开始的时候，我们有些绝对重要的机密。我们已经搞出了许多关于铀的材料，它的行为方式，所有这些材料保存在文件柜里的文件中，文件柜是木制的，只配制了常见的普通小挂锁。文件柜上有各种各样厂家生产的东西，比如有一个可以下拉的杆，然后有一个挂锁吊着它，但是常常只有一个挂锁。更为严重的是，你甚至不必开锁就能把材料从这些木头柜子中拿出来——你只需把它向后倾翻过去，你要知道，它底层的抽屉只由一根小棍托着，抽屉下面的木板有个洞，你可以从下面把抽屉里的文件拖出来。那段时间，我常常去撬锁，并告诉他们那锁很容易撬。每逢全组开会，大家都在的时候，我就站起来说，我们有重要的秘密，我们不能把这些重要机密保存在这样的木头柜里。锁太差了，我们需要好些的锁。

有一天特勒在会上站起来对我说，“没关系，我不把我最重要的机密材料放在文件柜里，我把它们放在办公桌抽屉里。这样更好吧？”我说，“不知道。我没看过你办公桌抽屉。”那次会上，他坐得比较靠前，我坐得比较靠后。话后会议继续进行，我则悄悄溜出会议室，下楼去看他的办公桌抽屉。呵？我甚至不必撬他办公桌抽屉的锁。事实证明，你把手从后面底下伸过去，就能掏出抽屉里的纸，像厕所里自动的卫生纸分发器，你拉出一张，它就拖出另一张，拖出另一张……我掏光了那个抽屉，拿出了里面所有的东西。我把拿出的东西放到一边去，然后上楼回到会场。会议正好结束，大家正往外走，我插入人群，随着人群往外走，像这样……我快步追上特勒，对他说，嗨，让我顺便看一下你的办公桌抽屉吧？”他说，“没问题。”于是我们一起走进他的办公室，他指给我他的办公桌，我看着桌子说，“真好”。我说，“我们来看看你办公桌里放了些什么。”“很高兴给你看看这些东西，如果你自己还没看过的话。”他一边说，一边插进钥匙，打开抽屉。开特勒先生这样高智商的人的玩笑，有点麻烦；他的反应太快，从觉察到有些不对劲，到完全明白是怎么回事，所需的时间那么短，让你享受不到丝毫取乐他人的乐趣！

哈，我还有许多和保险柜有关的趣事，不过和洛斯-阿拉莫斯没什么关系，就不多说了。我要谈我的另一些问题，特殊的问题，很有趣。有一件事，和欧克里奇*的工厂安全有关。洛斯-阿拉莫斯负责造炸弹，但是分离铀同位素的任务在欧克里奇，他们要分离铀 238，铀 236，235，其中铀

* Ork Ridge，田纳西州安得逊郡的一个城市，1942 年被选为铀的生产场所。——译者

235是有爆炸性的，呵？他们刚刚开始从一个实验物获得微量的铀235，而同时他们自己已在进行分离铀235的工作。那儿有个大工厂，他们将得到大桶大桶的材料，化学药品，他们要对这些已经提纯了的材料进行再提纯，以为下一个步骤做好准备——你得对它进行多次提炼。这样，他们一只手刚刚实验性地从一套装置中的一个得到一点点样品，另一只手已在处理化学材料。他们尝试着学习怎样分析它，以确定其中铀235的含量。我们从洛斯阿拉莫斯发给他们指令，教他们如何做，但他们怎么也做不对。最后，塞格雷（Segre）说，要想搞定这问题，唯一的办法是他亲自到欧克里奇去看看他们在做什么，去弄清楚为什么他们的分析总是错。但军方不同意："我们的政策是，所有洛斯-阿拉莫斯的信息不得外泄，欧克里奇的人不能知道他们所分离的铀做什么用，他们只能知道要做的事（分离铀）。"我的意思是，高层的人知道他们在分离铀，却不知道那炸弹的威力，或这炸弹具体是如何工作什么的；而下面的人则根本不知道自己在做什么。彼此之间没有任何信息的流通，这种情形正是军方所希望的。但塞格雷始终坚持要去欧克里奇，他说这很重要，欧克里奇的人可能永远也分析不对，那么整个儿都要付之一炬了。于是塞格雷就下去看欧克里奇的人在做什么。他一路走去，碰见他们正在推一大槽罐水，蓝色的水；这蓝色的水是硝酸铀。他问，"这水提纯之后，你们也用槽罐推着运送吗？你们就这么做？"他们说，"当然。为什么不？""不会爆炸？"他说。"嚯，爆炸！？？"这时军方有话说了，"你得知道，我们不该让任何信息传出去。"这件事证明，军方已经知道造一颗炸弹需要多少材料，比如20千克，或者多少；他们也知道，工厂里永远不会存有这么多提纯过的原料，所

以不会有爆炸的危险。但他们不知道，中子在水中减速后，活跃程度反而大大增加。所以在水中，只需不到十分之一，不，是百分之一，少得多的材料就能发生反应，从而造成放射。这虽然不会造成大爆炸，但造成放射，会杀死周围所有的人。因此这是很危险的，而他们根本就没有安全意识。

于是一封电报从奥本海默飞向塞格雷：把整个厂区走一遍，留心一下我们所有的精力应集中在哪里；在他们进行设计时，注意其程序。与此同时，我们要计算，为避免爆炸最多允许多少材料放在一起。有两个组负责计算的任务，克里斯蒂的组负责计算液态的临界量，我的组则负责计算装在盒子里的干粉的临界量。我们算出了可以放在一起的材料的量，并准备派克里斯蒂下去告诉欧克里奇的人情形如何如何。我高高兴兴地把我这组得出的数字全部交给克里斯蒂，对他说，“所有的资料都在你这儿，去吧。”可是克里斯蒂得了肺炎，我躲不过，只好去。这之前，我还从未坐过飞机，这回我要坐飞机去。他们把机密资料和一个小东西一起用带子绑在我背上！那时的飞机像公交车，除非两站之间的距离比较远，否则它要不时暂停。你得停下来等。站在我身边的小伙子带着个钥匙链，他手里拧着钥匙链，嘴里说着诸如这类的话：“这个时期，若飞机上没有个特别通行证，恐怕很难飞行。”我不好反对。我说，“哈，我不知道，我有个特别通行证。”一小会儿之后，上来了一些将军，他们把在 3 区的一部分乘客赶下了飞机。不过没关系，我在 2 区。那个乘客也许会写信给他的国会议员——如果他自己不是国会议员的话——说，在战争期间，他们把这些带优先号的小伙子们送到这儿送到那儿，这是在做什么！不管怎么说，我是到了那儿了。我做的第一件事，是让他们带我去那个工厂，但我

去工厂后什么也不说，只是看，观察每一件事。我发现那里的情况比塞格雷报告的还要糟，因为他是第一次去，所以被弄糊涂了。他只是注意到在一些大空地上有一定数目的盒子，但他没有注意到，一块大空地上的一间房子里有其他一些盒子，而另一边还有个相同的房间。他没有注意到这一类的事。你要知道，如果把太多的材料放在一起，会炸起来。我走遍了厂里的角角落落，虽然我的记忆力很坏，但在紧张工作时，我有很好的短期记忆力，我能回忆起所见到的各种出奇的东西，比如 92 号或 97 建筑、大桶的数目等等。那天夜里我回到家，把整个情况讨论了一遍，向他们解释危险都在哪儿，必须怎么解决。这很容易——你可以把镉放在溶液里去吸收水中的中子，你可以按一定的规则把盒子散开，使盒子不要太密，不要让太多的铀在一起，等等。我尽我所能地给他们举例子，想出了所有能想到的例子，并给他们讲冷冻过程如何发挥作用。我觉得，除非你了解工厂的运作情况，否则你不可能保证它安全。因此，我们决定第二天开个大会。

哦，我忘了说了，在我离开之前，奥本海默对我说，“喏，”他说，“你去的时候，下面这些人会技术性地下到欧克里奇去：韦伯先生，这位那位先生。我要你保证这些人都到会，一定要告诉他们是怎么回事，让他们真正理解安全——因为是他们在负责这些事。”我说，“但是，如果他们不到会怎么办呢？我怎么做？”他说，“那你就说——否则洛斯-阿拉莫斯不对欧克里奇的安全负责！！！”我说，“你的意思是，我，小理查德，到那儿去并对他们说……”他说，“是的，小理查德，你去完成这件事。”我真的迅速成长起来了！所以当我到了那儿，千真万确，我到那儿的第二天就开会，公司的所有人，我所要求的公司的大人物、技术人员都来了，

还有将军们等等，那些对这问题感兴趣的人，那些安排所有事情的人。那是个专门为非常严重的安全问题而开的大会，因为如果安全问题不解决，工厂就无法运行。我肯定，如果不是有人关注这问题，可能已经发生爆炸了。当时有个负责照顾我的中尉，他告诉我说，上校说你不能给他们讲中子如何发生作用等等所有的这些细节，因为我们希望不同部门的事情要分开来，你只须告诉他们如何安全地保存它就行了。我说，照我的看法，如若他们不能理解这些，他们就不可能理解并遵守那一套规则，除非他们知道它如何发生作用。所以我的观点是，必须告诉他们，除非让他们彻底而明白地了解铀的作用原理，否则洛斯-阿拉莫斯不对欧克里奇的安全负责！于是中尉去找上校，上校说，“我考虑五分钟。”他走向窗口，站在窗口沉思。这是他们最擅长的——他们善于作出决定。他不得不就是否向工人透露原子弹的工作原理这样的事作出决定，而且能够在五分钟内作出决定，我觉得这是十分了不起的。我因此而对这些军方的人万分佩服——不管给我多长时间，我也没有胆识对很重要的事做出决定！

最后，在五分钟之内，他说，“好吧，费曼先生，你去讲。”于是我坐下来告诉他们关于中子的所有知识，它们如何作用，哒，哒，嗒，嗒，嗒，聚在一起的中子太多了，你得把原料分开来放置；铀吸收中子，慢速中子比快速中子更活跃，等等——在洛斯阿拉莫斯，这些只是基本的入门知识，但欧克里奇的人却从没听说过这些，所以在他们眼里，我成了了不起的天才，是从天上下凡的神！所有这些他们以前不理解，甚至闻所未闻的现象，我都知道，我能告诉他们事实、数据和其他所有的东西。因此我这个在洛斯-阿拉莫斯本是很靠后的人，到欧克里奇竟成了顶呱呱的天才！我这

次欧克里奇之行产生了积极的效果，他们决定组成一个个小组，计划着自己去学习怎么做。他们着手重新设计工厂设备，设备设计师来了，处理分离物质的新工厂的建筑设计师、工程师、化工工程师都来了。还有其他一些人在那儿，而我这时却又要离开了。他们让我几个月后再来；他们要重新设计分离工厂。

几个月之后，也许是一个月之后吧，总之后来我又去了。这时S.W.公司的工程师已经完成了工厂的设计，该是我来检验了。呵？你怎么检验一个还没有建的工厂？我可不知道。我随着他们进了一个房间。你知道，我身边总有个祖姆瓦尔特（Zumvalt）中尉跟着，负责照顾我，所以我走到哪儿，都得有这个护卫——他和我同进同出。他把我带进一个房间。房间里有两个工程师，还有一个很长很长的桌子，超长的桌子，一张巨无霸桌子。桌子上铺着一张和桌子一样大的设计图，哦，不是一张设计图，是一摞设计图。我虽然在学校选修过机械制图的课程，然而读图纸确实非我所长。他们开始向我解释他们的设计图，因为他们认为我是个天才。他们这么开始："费曼先生，请看，工厂是这么设计的。你知道，我们必须避免的一件事是积聚问题。"问题是这样子的——那儿有个用来收集物质的蒸发皿，假如发生阀门堵塞之类的事，那儿就会积聚过量的物质，这会引起爆炸。他们向我解释说，在这个工厂的设计中，没有单阀门，所以即使某个阀门堵塞了，也不会发生什么事。每个地方至少都要有两个阀门。他们接着解释工作的过程：四氯化碳从这儿进来，那儿来的硝酸铀从这儿进去，它从这儿上去，这儿下来，它穿过楼板，从二层的管道上来……在图纸上，下去，上来，下去，上来，他们飞快地解释着这个十分十分复杂的

化学工厂。我整个都晕了，根本不知道那图纸上的符号是什么意思！有些东西我一开始以为是窗子，到处都是这些该死的、中间打着小叉叉的方框框。无数带着这该死的框框的线条，无数带着该死的框框的线条。我起初以为是窗子；但是，不，这不可能是窗子，因为它并不总是靠边上。我真想问问他们那是什么。你一定有过这样的经历——你没有立即问，如果立即问，就都 OK 了。但他们实在说得有点久了，你也犹豫太久了。如果你现在问他们，他们会说，“你早不问。这么长时间我们都白说了？”我不知道怎么办才好；暗自寻思：我向来都很幸运，（这次也不会例外吧？）你们可能不相信这个故事，但我发誓，这故事绝对真实，我的运气真是好到了极点。我不停地想，怎么办呢？怎么办呢？？？？？我终于想出了个主意。也许那是个阀门？为了弄清楚它是不是阀门，我伸出手指，点向第五页一张图纸的中心位置。我手指点在图上，说：“如果这个阀门堵塞了，会怎么样？”说这句话时，我脑子里浮想着他们可能的回答，“不，先生，那不是阀门，那是个窗子。”真是幸运，他们中的一个人看了另一个人一眼，说，“噢，如果那个阀门堵住了，”他们开始在图纸上上上下下，上上下下忙起来，另一个家伙也围着图纸上上下下，前前后后转起来。最后他们互相瞪眼，然后转而围到我身边来，张着嘴——“先生，您说得太对了。”最终的结局是，他们卷起图纸走了出去，我们也走出房间。那个从头到尾跟着我的祖姆瓦尔特中尉说，“您是位天才。那天您只在厂里走了一遍，第二天就和他们谈 90 栋 207 里的 C-21 号蒸发皿。从那时起我就知道您是个天才，”他说，“但是您刚才的所为，真是令人难以置信。我想知道，您是怎么做到这一点的？”我告诉他，你得试着去弄明白那东西是不

是个阀门。

除此之外，我还承担了另一类的问题。事情是这样的：我们需要做大量的计算，我们所用的计算工具是商务计算机。我顺便给你们一个洛斯-阿拉莫斯的印象——我们那儿有商务计算机。不知道你们知不知道它们什么样子，那是带着数字的手动计算机，你得用手推，它们就乘，除，加，等等。不过那时的商务计算机，只是些机械的小玩意儿，很难用，不像现在的操作这么容易。而且维修也很麻烦，必须送回厂去修。按照标准的做法，我们该有专门的维修人员；可是我们没有，所以通常情况下，是该送它们回厂去维修的。很快，计算器就被我们用坏了，于是我和其他几个人动手打开计算器的外壳。这本来是不允许的——使用规则里有“禁止打开机器外壳，否则概不负责……”结果我们打开了外壳，并且学到了一系列好东西。比如我们打开的第一台机器，里面有根带着个眼的杆，和一根这么挂着的弹簧。显然，弹簧应该扣在那个眼上——就这么简单。总之，上天暗助，我们获得了一系列修复这类小毛病的经验。后来我们越干越好，我们自己所做的维修也越来越精细。当然，遇到太复杂的问题，我们还是要送出去，作返厂维修，但简单的维修，我们就自己解决了，我们的工作也因此得以持续进行。我还修一些打字机。最后由我修所有的计算机，其他人不修了。我修过几台打字机，可是有个机械商店的家伙比我在行，所以就由他负责照管打字机；我呢，则去照管计算机。

好，言归正传。我们最终确定，我们的核心问题，是要确切地描绘出炸弹爆炸过程中的效应：用一个爆炸把核物质推进去，引发核爆炸，释放核物质，这个过程中究竟会有什么样的效应？要确切知道爆炸的效应，就得精确地算出爆炸

所释放的能量，等等。这需要大量的计算，远远超出我们的能力。一个名叫斯坦利·富兰寇（Stanley Frankle）的同事，十分聪明，他想到我们也许可以在IBM上完成这样的计算。IBM公司有商用的机器：有被称为制表机的加法器，是用来排列金额的；还有一个倍乘器，那只是一个机器，一个大盒子，你把卡片放进去，它会从每张卡片上取两个数字，相乘后把结果打印在卡片上。然后还有校对机，分类机等等。斯坦利·富兰寇决定把他的想法付诸实施，他已经有了个很好的设想：如果一个房间里有足够多的这种机器，我们就可以循环着处理卡片。我想现在每个从事数字计算的人，都能确切地知道我在说什么；但在当时，这却多少是个新鲜事物：利用机器进行大规模计算。

我们已经在加法器上做过这类事情。通常情况下你们得一步步走，自己做每一件事。但是这回不一样了——在这里，你首先去加法器，然后我们去倍乘器，然后你去加法器，如此这般。就这样，他设计了这么个东西，并向IBM公司订购机器。我们都认为这是一个好办法，可以解决我们所面临的问题。我们发现军队里有个人曾受过IBM训练。我们需要个人修理IBM，保持它们正常运转，等等。他们说要给我们这个人，但总是拖，拖。可是我们总是很急。我不得不向他们解释我们所做的一切，告诉他们我们希望以尽可能快的速度来工作。在这种特殊情况下，我们设计了所需的数字化步骤，机器所进行的计算步骤：乘上这个，然后加上这个，减掉那个。然后我们又设计好了程序。——但是我们没有机器来进行试验！怎么办呢？按照我的安排，我们布置了一些房间，每个房间里面配有女孩子，还有个“商务”。不过，是这个她做倍乘器，那个她做加法器，而另一个则负责

立方。我们有卡片，索引卡片，她的任务是把这个数字进行立方，然后传给下一个人。她摹仿倍乘器，下一个人则摹仿加法器。我们自己进行循环，解决了所有的困难。我们就用这种方法工作。结果，我们以尽可能快的速度进行着所有的计算步骤，之前我们还从来没有做过这么大量的计算，任何一个个人，任何一个从事过计算的人，都没有进行过这样的大量计算。但是福特（Ford）想出了个好主意，比其他的方法快许多，依他这个方案，我们所能达到的速度与 IBM 机器的预期速度旗鼓相当。唯一不同的是，IBM 机器不会累，它们可以连续三班次工作。但是女孩子们一会儿就累了。总之我们解决了工作程序中的所有问题，最后，机器也来了，只是没有维修的人。于是我们自己安装。在当时的技术条件下，它们算是很复杂的机器了，这些计算器——大家伙——是以组件的形式运过来的，附着许许多多连接线和安装图纸。我们自己动手组装，我，斯坦利·富兰寇，和另外一个人。安装过程中，我们遇到了麻烦。主要的麻烦是不停地有大人物跑来对我们说，“你们会把东西弄坏的，你们会把东西弄坏的。”我们把部件安装起来，有的时候能运行，有的时候装错了，不能运行。我们就瞎碰着鼓弄，让它们运行起来。我们没能让它们全部运行起来，在我最后安装一台倍乘器时，我看见里面有个东西弯曲了，但我不敢弄直它，怕把它啪的一声折断了。他们总是警告我们可能把机器搞得无法修复。最后，按预定的计划，IBM 公司的人来了。他把我们留下的、没有搞定的部分安装好，我们的程序终于运行起来了。但是，在我曾被卡住的地方，他也卡住了。三天过去了，他还在忙那最后一台机器。我走过去说，“噢，我发现那个地方弯了。”他说，“噢，正是，问题就在那儿。”（打个

响指）——全好了。整个过程就是这样。

好，富兰寇先生开始施行他的计划，同时也开始了遭受一种疾病的折磨——计算机病。在今天，每个用计算机工作的人都知道这个病，那是个十分厉害的病，干扰整个工作。这是我们面临的一个严重问题。所谓计算机病，就是你“玩”计算机，沉沦其中，不能自拔。计算机真是奇妙极了。你控制这些 x 键，它们约定，是偶数你就这么做，是奇数你就那么做，如果你足够聪明的话，你很快就能在一台机器上做越来越复杂的事。结果，不久之后整个系统就瘫痪了。他不再关心工作，不再督管任何人，系统运行得很慢、很慢。但真正的问题是，他一直坐在一间办公室里设计怎样让制表机自动打印 arc-tangent x，然后机器就开始打印，成行成列地打印，噗呲，噗呲，噗呲，一边打印一边还自动用积分法计算反正切的值，整张表都是那个运算。这毫无价值，因为我们有反正切表。不过，如果你用计算机工作过，你就会理解这种病，其中的乐趣，是能让你知道你究竟能做到哪一步。他第一次得了这种病，这个可怜的家伙，他发明了这个东西，却得了这种病。

他们因此要我停下手上正在做的工作，去负责 IBM 组。我留心着这种计算机病，并努力避免它。我有个很出色的团队，尽管他们在九个月里只做了三个项目。最大的问题是他们从未告诉这帮小伙子真相——他们从全国各地选出了个“特殊工程分遣队”。这些从高中来的、有工程潜力的聪明男孩，军方把他们召集到“特殊工程分遣队”，送到洛斯-阿拉莫斯来。他们把这帮小伙子安置在军营里，又想什么都不告诉他们。他们来这儿工作，分配到 IBM 机器上，打那些莫名其妙的洞、数字，却没有人告诉他们其中的意思。工作因此

进行得很慢。我说，现在首要的事情，是让这些技术员知道他们在做什么。奥本海默就去和安全局的人谈，终于得到了特许。于是我发表了个精彩的演讲，告诉他们我们做的是什么样的事，结果他们都很激动。我们在进行一场战争，我们明白这是什么。他们明白了这些数字的意义。如果出来的压力越高，这就意味着释放出来的能量越多，如此等等。他们明白了自己在做什么，状态因此有了彻底的转变！他们开始去发明一些可以做得更好的新方法；他们改进了计划；他们夜里加班而不需要任何监督。他们不需要你费什么心，他们什么都明白。他们发明了好些我们使用的程序，等等。我的这些小伙子们真的熬过来了，我们所需做的仅仅是告知他们真相，这就足够了。如果只是“不要把秘密透露给他们”，“他们在打洞”……千万别！我的这种开明态度带来了很好的结果：他们过去九个月里只做了三个项目，而现在三个月却做了九个项目，速度比以前快了近十倍。当然，做这些事情的时候，我们有些秘诀，秘诀之一是这样的：我们所要做的事情，是把一捆卡片循环一遍，先加，然后再乘。卡片要在房间里的这些机器间循环着转来转去，所以速度比较慢。我们想出个新方法：我们用了一套有不同颜色的卡片，也把它们循环一遍，不过是非同步的循环。我们同时处理两个或三个问题。你知道，这是另一个问题。在这个问题上加，同时在另一个问题上乘。通过这样的集约计划，我们完成了多得多的项目。

最后，在战争接近结束的时候，也就是在我们不得不在阿拉莫戈多*进行一次试爆之前，我们要解决的问题是：会

* Alamogordo，新墨西哥州南部的一个城市。——译者

释放出来多少能量？我们已经计算过好多种不同设计方案所释放的能量，而惟独最终选定的这个特殊设计方案的结果我们没有计算。克里斯蒂从上面来了，他说，希望能在一个月内知道结果，或很短的时间里，比如三周。我说，“不可能。”他说，“你看，你们一周内 *就处理了那么多问题。每个问题只需两周或三周。”我说，“我知道。但是这个问题所需要的时间长得多。我们都是平行地处理多个问题，如果一个个顺着来，要很长时间，没有办法运转得更快。”但他一走出门，我就开始思考——有没有办法运转得更快些？比如，要是我们不让机器做其他任何事情，即是说把机器上进行的其他工作都停下来，就不会有其他的干扰了，等等，等等。我开始思考。我在黑板上向小伙子们写下个挑战——能不能做到？他们齐声应答，能，我们两班次倒班，24 小时工作，大家说的都是这类的话：我们愿努力一试。我们愿努力一试！！于是定下原则，所有其他的事全部让路，集中精力，只做这一件事。然后他们就开始工作。

我夫人在阿布圭基病逝，我必须过去。我借了富克（Fuch）的汽车，他是我宿舍里的一个朋友。他有辆汽车，他就用这辆车把机密文件带到圣大非 **去。他是个间谍，当时我不知道这些。我借他的车去阿布圭基，那该死的车在路上瘪了三次胎。从那儿回来后，我走进房间——因为我负责督管所有的事，而我已经三天没有去检查了。这时大家正在忙乱中，在为了算出即将在沙漠中进行的那个试验的答案进行大冲刺。我走进房间，发现那儿有三种不同颜色的卡片，白色的，蓝色的，黄色的。我说，“嗨，你们不该做其他的

* 原文如此，应该是“一月”之误。译者

** Santa Fe，新墨西哥州首府。译者

事——只能做一件事！”他们说，“出去，出去，出去。等会儿再向你解释这一切。”于是我就等他们的解释。事情是这样的：在工作过程中，有时机器会出错，或者他们放错了卡片，这些情况都发生过。我们以往的处理方法是回头重做。但是他们注意到，卡片的张数代表着机器里的位置和深度，或空间什么的。一组中某个地方发生了错误，只影响邻近的数字，下一组也只影响邻近的数字，就这样。它是通过一副卡片发展下去的。比如共有五十张卡片，你在序号为 39 的那张犯错了，就会影响到 37、38 和 39。下一个则是 36、37、38、39 和 40。下一次，它就扩散开去，像病一样。他们发现了个错误，在后退回去的时候，他们想出了个主意。他们只计算错误周围的一小副卡片，10 张。因为 10 张卡片通过机器的速度，要比 50 张卡片通过机器的速度快得多，所以他们就把这 10 张的那部分很快地过一遍，而同时让那 50 张卡片伴随着病毒的扩散继续前进。但是这带来另一个问题，计算加快了，他们得把它整个儿签封并进行纠正。呵？太聪明了。这就是那帮小伙子们工作的方法，为了获得速度，他们确实很努力，也表现得很聪明。没有其他路可走。假如停下来修复错误的话，我们就会浪费时间，就不能完成任务了。这就是他们所做的事情。你当然知道他们做这些事时会发生什么状况。他们在蓝色的卡片中发现一个错误。于是他们拿一副张数少一些的黄色卡片，你知道，这副黄色的卡片的运转速度比那副蓝色的快。正当他们手忙脚乱之时——因为纠正了这个问题后，他们又得去处理白色的那副卡片——他们还要把其他卡片拿掉，换上正确的，准确无误地继续工作。你该知道那是个什么样的场面，那是很让人头疼的。你不能犯一个错误！可是就在他们忙活着三副卡

片，并要把它们全部签封时，老板进来了。“走开，别打岔，”他们说。我就退开，让他们自己做，结果一切OK。我们及时完成了任务，就这样。

接下来，我想跟你们简单说说我所遇到的一些人。一开始的时候，我在基层，后来成为一个组长。但是除了评估委员会的人（我在洛斯-阿拉莫斯所遇到的人）之外，我还结识了其他一些很伟大的人物。那时我遇见了许多杰出的物理学家，人数如此之多，可算我人生中的一大重要经历。许多大大小小的人物，有些是我曾经听说过的，但这里面也包括一些顶尖人物。这其中当然包括费米*，他来过一次。第一次是从芝加哥来的，来给我们提供一点咨询：如果我们有什么问题，他可以帮助我们。我们和他开过一次会议，那时我正在做一些计算，并且取得了一些结果。这些计算如此复杂，导致计算很困难。通常来说，我是这方面的专家，我总能预见到结果会是什么样子；或者得到结果了，我总能够解释为什么结果是这样。但这一回的计算太复杂了，我不能解释为什么这样。于是我告诉费米我正在做这个问题，并开始计算——他说，等等，在你告诉我结果之前，让我想想。结果应该是这样（他是对的），结果应该是这样，因为什么、什么原因。他给出了完全清晰的解释……你看，他在做我所擅长的事情，做得比我好十倍。这对我来说是个很大的教训。

然后是冯·诺伊曼（Von Neumann），他是个大数学家。他建议说，“我不想介入这儿的事情，介入这些很聪明的技

---

* Fermi （1901~1954）因证实新的放射性物质的存在及其相关工作而获1938年诺贝尔物理学奖。1942年11月，费曼还负责芝加哥大学的第一个受控核反应。——编者

术性观察。”我们在数字计算方面有些很有趣的现象。那现象看起来似乎不稳定，他就解释为什么这样，等等。这是个很好的技术性建议。但我们经常为了休息而去散步，比如说星期天什么的。我们会去临近的峡谷散步，通常是和贝蒂、冯·诺伊曼、巴赫（Bacher）一起。这样的散步是件极大的乐事。冯·诺伊曼有一个很有意思的观念：你没有义务为你生活的这个世界负责。这是他教给我的一件事。在冯·诺伊曼的忠告下，我已经形成了很强的对社会无责任的感觉。从此之后我就成了个很快乐的人。但是这是冯·诺伊曼种下的种子，它现在长成了我的活跃的无责任感。

我还碰到了玻尔 *，这真有意思。他那时的名字叫尼古拉斯贝·克（Nicholas Baker），他是和他的儿子吉姆·贝克（Jim Baker）一起来的，他儿子现在的名字叫阿格 **。他们是从丹麦来访问的。大家都知道，他们是非常著名的物理学家。对所有其他大人物来说，玻尔简直就是伟大的神，他们都倾听他说话。他要在会上发表一些谈话，我们都去了——每个人都想去见见伟大的玻尔。人很多，我坐在后面的某个角落里；我们谈原子弹的一些问题，进行一些讨论。这是我第一次见到玻尔。他来了，又走了，我只是从一个角落里，从别人的脑袋之间看见了玻尔。他还要来。在他第二次来的那天早晨，我接到一个电话。“你好，费曼吗？”“是的。”“我是吉姆·贝克，”是玻尔的儿子。“我父亲和我想和你谈谈。”“我？我是费曼，我只是个……”“对，就是你。”早上八点，别人都还没睡醒，我就去赴约了。我们进了技术区的

---

* Niels Bohr（1885~1962）因为他在原子结构及原子能方面的研究，1922年获诺贝尔物理学奖。——编者

** Arge Bohr（1922~）与 Ben Muttelson 和 James Rainwater 以他们的原子核结构理论分享 1975 年诺贝尔物理学奖。——编者

一间办公室，他说，“我们正在思考怎样才能让炸弹的效力更高，我们想到了下面这些办法。”我说，“不，这不行，不会有效果，胡扯，胡扯，胡扯。”他又说，“那么这样行不行？”我说，“似乎稍微好一点点，但有些地方也很蠢。”我们就这么来来回回争论。有一件事我总是不开窍，我从来不知道自己是在跟谁说话。我心中只有物理学，如果某个想法看起来蠢，我就说这想法看起来好蠢；如果某个想法好，我就说它好。就这么简单，我向来如此。如果你能做到这一点，你会发现这是种很好、很愉快的感觉。我很幸运，就像我在蓝图事件中那么幸运一样。能够做这一点，是我一生的幸运。我们如此这般谈了大概有两个小时，前前后后讨论了许多想法，然后选择，争论。伟大的玻尔一直燃着烟斗，一会儿一支，一会儿一支。他用一种难以理解的方式说话，咕噜咕噜，似乎自言自语，很难懂。倒是他儿子的话容易理解一些。最后，他说，“好，”他燃着烟斗说，“我想现在可以叫大人物们来了。”于是他们把所有其他人召集来，和他们进行讨论。他儿子后来告诉我，事情是这样的——他上次来这儿时，曾对他儿子说——“记得坐在后面的那个小家伙的名字吗？他是唯一不怕我的人，如果我的想法疯狂的话，他会直说出来。所以下次我们要讨论一些想法时，不能和这些什么事都说‘对，对，玻尔博士’的人谈。先找那个家伙，我们先和他谈。”

我们完成计算后，接下来的事当然就是试验。我们必须要做试验。那时我恰好在家休短假，我想是因为我夫人去世的缘故。我收到洛斯-阿拉莫斯来的一个信，说，“孩子要出生了，预定的时间是某某天。”于是我飞回去，我赶到那儿的时候，公共汽车正要出发，我甚至房间都没进就上了车。

到了阿拉莫戈多，我们在某个距离外等待，有 20 英里远。我们有个无线电接受器，他们将向我们报告试验什么时候开始等等情况。开始的时候，收音机没有信号，我们对事情的进展一无所知。一直等到预定试验时间的前几分钟，收音机才开始工作，他们告诉我们还有 20 秒，或者将要怎样怎样。对于像处在我们这么远距离的人——其他人近一些，6 英里——他们分发了墨镜，你可以通过它来看。墨镜！20 英里外，你拿到了副墨镜——其实通过墨镜你什么也看不到。但是我想到，唯一真正可能伤害眼睛的是紫外线，而绝不是可见光。于是我躲到一辆卡车的挡风玻璃后面，紫外线穿不过玻璃，这样就安全了，而我也可以看到要看的东西。其他人绝对看不到那景象。好。时间到，那儿闪出了巨大的闪光，如此明亮，我很快在卡车的地板上看到了紫色光斑。我说，“那不是它本身，那是后影。”我于是抬起身，我看见这白光变成了黄色，又变成橘红色。蘑菇云形成又消失，压力和膨胀形成了蘑菇云，又使之消失。最后，是一个橘红色大球，其中心如此明亮，变成了个橘红色球开始上升，有点点波动，周边有点暗。然后你发现，这是个烟和着闪光的大球，内部喷出火焰，热量。我看到了这一切，我所描述的这一切其实只是一瞬间，大概就一分钟吧。这是个从亮到黑的序列过程，我都看到了。我恐怕是唯一真正看到那东西的人，第一次“三一试验”*。其他人都戴着墨镜，而六英里处的人也不可能看见，因为他们都被要求闭着眼睛躺在地上，所以没人看到这景象。我那儿的人都戴上了墨镜，我是唯一一个肉眼看到这一切的人。最后，大约一分半钟后，突然传来一声

* Trinity Test 是第一次原子弹试爆试验的代号。Trinity（基督教）三位一体。——译者

巨响，梆，然后是一阵摇晃，像是地震，这才让我真正相信确实爆炸了。整个这一分钟内，没有人说一句话，大家只是静静地看着。但是这声音终于使大家松了口气，特别是使我松了口气，因为远处那确凿无疑的响声意味着真的成功了。声音传来时，站在我身边的一个人问我，“那是什么？”我说，“那是炸弹。”那个人是《纽约时报》的威廉·劳伦斯（William Laurence），他也来了。他要写一篇文章，描述整个过程。我负责接待他，结果发现对他来说这事的技术性太强了。

稍后，普林斯顿的司密斯先生来了，我领他参观洛斯-阿拉莫斯。有一次，我们走进一个房间，在一个基座的尽头，有一个比基座稍为窄一点的小球，有这么大，放在一个银托盘上——你可以把手放在上面，是热的。它有放射性，是钚。我们站在房间的门口谈论着那个小球。这里有一种人造的新元素，这种新元素，也许在地球的形成期那段很短的时期内曾经存在过，除此之外，地球上从未出现过。它在这房间里被完全隔离着，它有放射性，有这些属性。我们造出了这元素，它有极高的价值，没有比它更有价值的东西了。我们就在门口扯着这些事。你知道，人们在聊天的时候，总是要晃来晃去的。司密斯先生用脚踢着门档，我说着“是，是”；我说这门档比门更配得上这个房间。门档是个半球形的黄色金属，实际上是金的，这么大的一个金半球。事情是这样的：我们需要做个实验，看看多少中子被不同的材料反射；为了储存中子，我们没有用太多的钚。我们试验了铂（白金），试验了锌，试验了铜，试验了金。因为用金进行试验，我们就有了这一片片金。有人出了个聪明主意，用这些贵重的金球给保存钚的门做个门档，这和贵重的钚是很般

配的。

原子弹爆炸之后，我们得到了消息。洛斯-阿拉莫斯沸腾了。所有人都去聚会欢庆，我们满街跑。我坐在一辆吉普车尾上敲起鼓。我记得有一个人除外，那个最初把我拉进这工程的鲍勃·威尔逊。他坐在那儿郁郁寡欢。我说，“你在愁什么呢？”他说，“我们造了个可怕的东西。”我说，“但是是你启动了这个工程，是你把我们带进来的。”你知道，对我，对我们其他人，我们是因为一个非常好的理由而开始了这项工作，我们工作十分努力，努力完成它，它是我们的快乐，令人兴奋。于是你停止了思考，你看，你就是不思考了。你在刚开始的时候有过思考，之后就不再想了。所以他是唯一一个在那种特殊时刻还在思考的人。之后不久，我回到了社会，去康奈尔任教。（返回社会后）我对这社会的第一个印象很奇怪，我无法理解那印象，但我那时的感觉很强烈。比如，我坐在纽约的一个餐馆里，看着外面的建筑，我会想：广岛炸弹的破坏半径有多大，多远？这里离第 34 街有多远？所有这些建筑，全都会被摧毁。我会想到这一类的事情。我产生了一种很奇怪的感觉。我沿着街走，看见人们在造一个桥，或者他们正在新修一条路，我就想，他们真可笑，他们是不可能理解的，不可能理解的。他们为什么要造这些新东西？这毫无意义。但幸运的是，这毫无意义的感觉只持续了 30 年，现在不这样了；或者，我们也许会造 30 年。我错了 30 年，以为造新桥毫无意义；我很高兴其他那些人能够往前走。但是原子弹工程结束后，我的第一个反应是，修筑什么都毫无意义。谢谢诸位。

提问：能不能说说您关于保险柜的故事？

费曼：噢，关于保险柜有好多故事。如果你愿意给我

10 分钟时间，我给你讲三个有关保险柜的故事，怎么样？我最初开文件柜，后来撬锁的冲动渐渐发展成为对所有保险柜的兴趣。有人曾教我怎么撬锁。然后他们又装配有带安全码的文件柜。我有一个毛病，我一生中的一个爱好，那就是，遇到谜，我总想去解开它。每个人都有那种文件柜，我们的资料就放在里面。那些文件柜上的锁——莫斯勒制锁公司生产的密码锁——对我是个挑战。究竟怎么开这些锁？！于是我就琢磨它们，研究它们。关于开密码锁，有各种各样的故事，讲如何感觉密码，如何听密码，等等。这是真的，我懂，而且领会得很好。但这办法只对老式的保险柜有用。现在他们有了一种新设计，在你转动那密码盘时，没有任何东西压着盘。我这里不谈技术上的细节——总之，所有的老办法都失效了。我也读锁匠们写的书，锁匠们的书开头总是讲他们如何打开了锁，这是他们最伟大的事业；女人落水，保险柜落水，女人快淹死了或什么的，然后他打开了保险柜。这种荒诞的故事，我读不懂。后面他就给你讲他是如何能够做到这一点，但是他不会告诉你任何切实的事，这给人一种感觉，他们好像不可能真的那么打开锁。比如某个人用他所特有的心理功能猜密码！我总是想，他们可能是要保密。总之，我坚持研究。真像是一种病，我一直耗在这些事情上不肯罢休，直到有了新发现。首先，我弄清楚了开密码需要多大的范围，你必须靠它多近。然后我又发明了一套办法，用这套方法，你可以尝试所有必须尝试的密码。事实证明，共有八千种，因为你得尝试任意两个数字的组合。然后我又知道，每个第五数字出自 120000……八千密码。然后我又搞出一个方案，在这个方案里，通过正确地转动码盘，我可以尝试各种数码而不必更改已设定的数码。因此我可以

在 8 个小时内，尝试所有的密码。我还进一步发现——这大概花了我两年的研究时间，你知道，我在那儿无事可做，到处闲逛——最终我发现了一个方法可以轻易取得数码。数码的后两位，在保险柜开着的时候，密码的最后两位是可以看出的。抽屉拉出的时候，你可以转动数码，看着那根杆上抬、旋转，找出什么数码时杆上升，什么数码时杆回落，等等。用这个小花招，你就可以解开密码。我整天练习，你知道，整天练习，就像洗牌手练习洗牌一样。我的动作越来越快，越来越自然。我走进一个房间，倚在某个人的文件柜上和他闲谈；你甚至不会注意到我在做什么，就像我现在一边说话，一边玩着手里的手表，你不会注意的。我什么也没做，只是拨弄着拨号盘而已，就这样拨弄着拨号盘。但是我其实是在搞那两个数字码！然后我回到我的办公室，记下那两个数字，三个数字中的后两个。好，如果已经知道了后两个数字，那么你只需一分钟就可以试出第一个数字了，只有二十种可能。呵？

因此我在开锁方面很出名。他们会跑过来向我说，“席玛尔茨（Schmultz）先生出城了，我们需要他保险柜里的一份材料。你能不能打开？”我会说，“没问题，能打开。我得去拿工具。”（其实我什么工具也不需要）我要到自己的办公室去看他保险柜的密码。我有密码的后两位，我在办公室里保存着每个人的保险柜密码。然后我拿一把螺丝刀放在背包里，权充我所谓的工具。回到要开保险柜的那个房间，我会关上门——意思是说，开保险柜这本事，不能大家都会，因为这会弄得什么事都很不安全；如果每个人都知道怎么开锁，就太危险了。关上门后，我就坐下来，拿本杂志出来读，或者做点其他什么事。我平均大概有 20 分钟什么也不

做，然后我打开它，顺利地打开它。我会在房间里坐上 20 分钟，让他们觉得开密码锁并不是件容易的事。我就这样花 20 分钟，为自己赢得个好名声，其实没什么花招。然后我走出房间，带着点汗，说，“来吧，打开了。”呵？

但是也有一次，在一个特殊的情况下，我完全是靠运气才打开了一个保险柜。不过这件事倒是进一步巩固了我的声誉。那是个轰动的事件，那也完全是幸运，与我在“蓝图”事件中的幸运一模一样。战争结束之后——我现在可以告诉你们这些故事——战争结束后，我回到洛斯-阿拉莫斯继续完成一些论文。在那里，我干了些开保险柜的事——就这些事我可以写本保险柜克星一类的书，会比任何保险柜克星写得还好。书的开头，我将说明我是如何在不知道密码的情况下酷酷地打开保险柜的，那里面保存的东西，比任何曾打开过的保险柜里的东西更为机密。我打开的保险柜里面保存着原子弹的秘密，所有关于原子弹的秘密，配方，铀的中子释放率，造一个原子弹需要多少铀，所有的理论，所有的计算，这整个要命的一切都在这里！

我是这么做成这件事的。呵？我准备写个报告，我需要有这么个报告。那是个星期六，我以为大家都上班，像从前的洛斯-阿拉莫斯一样。所以我就去了图书馆取资料。洛斯-阿拉莫斯的图书馆中有所有这些文件。那里有个巨大的保险库，保险库上有个巨大的异样把手，我对这个把手一无所知。文件柜我懂，但我仅仅是个文件柜专家。不仅如此，那保险库前面还有背着枪的保卫走来走去。你不可能把这保险库打开。但是我想，慢着！老弗雷迪·迪浩夫曼（Freddy Dehoffman）在解密区，他负责解密文件。哪些文件现在可以解密呢？所以他不得不频繁地在图书馆之间奔波来奔波

去，这让他又烦又累。后来他有了个高明的主意，他要把保存在洛斯-阿拉莫斯图书馆的每一份文件备了个份。他已把它归入了他的文档里，他有九个文件柜，装满了洛斯-阿拉莫斯的所有文件，一个挨一个，放在两个房间里。他已经拿到了复印件，而我也知道他有那些东西，所以我就去找迪浩夫曼，请他把文件借给我。我去了他的办公室，他的办公室门开着。当时的情形，好像他就要回来，因为灯还亮着，似乎他随时都可能回来。我就等。像平常那样，我一边等，一边琢磨着文件柜的把手。试试 10-20-30，不行；试试 20-40-60，也不行。所有的都试了，我在他办公室等着，无事可做。然后我就开始想起那些锁匠，我从来未能想象怎么很聪明地开锁。也许他们自己也不能，但也有可能他们关于心理结构的那些说法都是对的。首先，书中说，“秘书很紧张，她害怕自己会忘记密码。”她可能忘记，老板也可能忘记——她必须明白这一点。所以她就紧张地把密码记在某个地方。会记在哪儿呢？列出秘书可能记密码的地方。呵？最聪明的事是从抽屉开始找，立即开始——你拉出抽屉，抽屉的木边上，外面，潦草地写着个数字，好像是个发票的数字。那就是密码。办公桌边上的抽屉，对吧？我记得书上就是这么说的。迪浩夫曼的办公桌抽屉锁着，我轻而易举地撬开了锁。成功地开了锁，我拉出抽屉，顺着木缘看——什么也没有。没关系，没关系。抽屉里有许多纸，我在纸堆里翻，最终发现了一张精致的小纸片，上面有希腊字母表，α，β，γ，δ，等等，印得很细心。当他们谈起这些字母时，秘书必须得会写，会念。是吧？所以秘书们每人都有这么个字母表。但是——在那希腊字母表的上方，潦草地写着 π = 3.14159 好，她为什么要 π 的数值，她不会是在计算什么

吧？于是我走向保险柜。真诚，这是真诚，是不是？简直就像书中的情节。我只是在向你们报告我是怎么解决那问题的。我走向保险柜。31-41-59，不行。13-14-95，不行。95-14-13，不行。14-31……20 分钟，我把 π 值颠来倒去，但毫无结果。于是我举步走出迪浩夫曼的办公室，这时我想起心理学的书，我说："应该就是这样的。"从心理上说，我是对的。迪浩夫曼正是那种用数学常数来做密码的人。另一个重要的数学常数是 e。于是我又转身走向保险柜，27-18-28，滴，答，开了。我一路查下去，所有保险柜的密码都是一样。好，关于保险柜还有许多故事，但这是其中最精彩的一个，时间已经很晚了，我们就以它来结束这次演讲。

4　科学文化在现代社会中扮演什么角色？应该扮演什么角色？

这是 1964 年费曼在意大利的伽利略论坛上对一群科学家发表的谈话。费曼谈了科学对宗教、社会和哲学的影响，并警告说我们的怀疑能力将决定文明的将来。演讲中，费曼对伽利略数致敬意，多次提到伽利略的伟大工作以及伽利略所遭受的极度痛苦，

我是费曼教授，虽然我今天穿着正装。通常情况下，我在演讲时是不穿外套的，但今天早晨离开宾馆时，我夫人说对我说："你必须穿件外套。"我说："可是我演讲时一般都不穿外套。"她说："是的。可是你得知道这一次是什么场合，你最好给人个好印象……"所以我就穿了这么件外套。

我要演讲的主题，是伯纳蒂尼*教授定的。首先得申明，就我个人的观点，我认为替科学文化找到它在现代社会中的恰当位置，这与解决现代社会的问题是两回事。现代社会的大量问题，与科学在社会中的地位这件事毫无关系；以为简单地从某个方面实现了科学和社会的理想配合，就等于解决了所有问题，这种想法不过是个美丽的梦罢了。所以请你理解，尽管我会建议对科学和社会的关系进行一些调整，但我并不奢望这些调整就是社会问题的解决。

我们这个现代社会似乎正受到一系列严重的威胁，其中之一是我所要关注的，也是今天这个演讲的中心论题——尽管这个演讲里面还会有其他一些次要的论题——我要讨论的中心论题是：我相信，现代社会最大的一个危险，是思想控制的观念可能会复活、膨胀，比如说希特勒的思想，斯大林时期的思想，中世纪的天主教等。我觉得最大的一个危险，是这种思想可能增强，直至席卷全世界。

那么，说到科学和社会的科学文化之间的关系，我们立即会想起的一件事，当然也是最明显的一件事，就是科学的应用。而且，应用也是文化。但是我今天不想去讨论应用的问题；我不去讨论应用问题，并没有什么特别好的理由。我

* Benaedini，论坛的主席。——编者

很高兴，我们所有关于科学和社会关系的流行话题，几乎完全是围绕着科学的应用问题；再进一步，科学家们因其所从事的工作而面临的道德问题，通常也涉及科学的应用。尽管如此，我还是不想去讨论科学应用的问题，因为这里还有其他一些人们没怎么谈过的话题；出于我个人的兴趣，我想从一个稍稍不同的角度，来谈谈这些其他人还没怎么谈过的话题。

不过，我先要说一说你们都喜欢说的应用问题。科学通过它的知识，创造了一种力量，一种做事情的力量：科学地掌握了一些东西之后，你能够做事情。但是科学没有教育这力量怎么去做好事而不做坏事。换一种简单的说法：我们没有关于这种力量的教育；用或者不用科学，这个问题从本质上来说其实是对应用的管理，我们要有个正确应用科学的途径，使它尽可能向善，少一些危害。当然，从事科学活动的人们有时会说这不是他们的责任，因为应用仅仅是一种去做的力量，这与你用它去做什么，是两件不相干的事。但是，尽管他在如何控制这力量，使之对自己有益而非有害这方面有许多困难，一定意义上来说，为了人类而发明一种控制这力量的能力，这应该还是有意义的。

我还可以说，尽管我们在座的有许多人是物理学家，我们大多数人是从物理学的方面去思考严重的社会问题的，但是我坚信，下一个发现自己在应用方面陷入道德困境的科学，将会是生物学。而且，对于科学来说，如果说物理学的发展似乎（给人类）带来了难题，那么生物知识发展所带来的问题恐怕就要是荒谬了。已经有人暗示过这些可能，比如在赫胥黎*的《美丽新世界》这本书里。但是你们自己还可

* Huxley（1894~1993）美籍英国作家，《美丽新世界》是其代表作。——译者

以想到许多事。比如，如果在遥远的将来能量可以藉由物理学的帮助而自由、方便地供应，那么把原子这么放在一起，用原子所具有的能量来生产食物，就仅仅是化学上的一件小事了。于是你可以任意生产食物，像人类排出的废物一样多，而且因为物质是守恒的，所以也不会再有所谓的粮食问题。到我们了解了如何控制遗传的时候，则会出现严重的社会问题。比如，我们用什么样的一种控制？用好的还是用坏的？设想一下，我们若发现幸福或其他什么情感（比如野心）的生理基础，那么你想想，我们就可以控制某个人，使他有野心，或者没有野心。最后，就是死亡的问题。

在所有的生物科学中，我们找不到任何必须死亡的线索，这是最令人惊奇的一件事情。你也许会说，我们一直想造永动机，然而在物理研究中，我们已经发现了足够多的定律表明永动机绝无可能，除非这些定律全都错了。但是在生物学中还没有任何发现能够宣称死亡不可避免。这使我想到，死亡根本就不是不可避免；生物学家们早晚会发现究竟是什么引起我们死亡，这只是个时间问题，人类可怕的普遍性疾病或者人的肉体的暂时性，在将来是能够治愈的。总之，你将看到，生物学会带来大量、大量的问题。

现在，我想从一个不同的方向来谈。

除了应用的问题之外，还有思想的问题。思想有两类。其中有一类是科学自身的产物，由科学而产生的一个世界观。从某些方面来看，这是整个科学最美丽的一部分。有些人认为，不，科学的方法才是它最美丽的部分。这取决于你是喜欢结果还是途径，但是途径会带来一些美妙的结果。我不想讨论其中的细节，以免使你厌烦（如果我做得好的话，就不会让你厌烦）。但是在座各位对科学的奇妙都有些了

解——坐在下面的不是普通的听众——所以我不打算摆出这个世界的一些事实来一次又一次地煽动你的热情：事实是，我们都是由原子构成的，这里有巨大的、无垠的时间和空间，而我们自己的位置，从历史的眼光看，是一系列不平常的进化的结果。我们本身在进化序列中的位置——再深入一点说，尽管我们说自己是（宇宙间的）特殊之物，其实我们并不是——在这个意义上，我们科学的世界观最杰出的一面，是它的统一性（普遍性）。在全部生物学上，最具前景的假设之一是：动物所做的一切事，或者生物所做的一切事，都可以从原子所能做的这个角度去理解，也就是说，可以从彻底的物理定律的角度去理解。对这种可能性的永恒关注——至今还没有证明有什么例外——已经一次又一次提醒我们机械主义究竟是怎么形成的。因此，我们的知识确实具有普遍性这个事实，并不是件完全让人舒服的事。理论的状况如此完备，以至我们忍不住要去寻找例外，我们非常努力地去寻找例外——至少物理领域是这样的——所有这些昂贵的设备等等，都是为了寻找与我们所知不同的例外。当然，这个事实还有它另外的一个方面，即构成天上星星的原子，和构成地上奶牛、人、石头的原子是同样的，这样看来，这个世界又是如此美妙。

我们一直想和科学界之外的朋友们交流这种世界观——但是我们常常陷入困难，因为他们在最初步的方面尚且一无所知，而我们却要尝试着向他们解释最新的问题——比如CP守恒*的意义，这让我们无所适从。从伽利略开始，四百

* 电量和宇称守恒，物理学上最基本的一个守恒定律，认为进入一个相互作用的总电子电量和宇称与从这个相互作用出来的总电子电量和宇称应该是一样的。宇称是亚原子粒子的一个内在的对称属性。——编者

年来我们都在收集他们所不了解的这个世界的信息。现在我们正在理出一些头绪——当然，是在科学知识的限度内。那些出现在报纸上的，和那些可能刺激成人们想像力的，通常都是他们不可能理解的，因为他们根本就没有去学习任何此前人们已经发现的、极其有趣的、（对科学家们来说）是众所周知的东西。谢天谢地，孩子们暂时还不是这样——至少在他们成年之前。

我说，我也是这么认为的：你们一定都从经验了解到，民众——我指的是普通人，绝大部分的人，数目巨大的大众——是可悲可叹的，他们对自己所生活的这个世界的科学完全无知，而且能够忍受自己的愚昧，就这样生活下去。我不是要诅咒他们，我的意思是他们竟然能够就这样生活下去而没有丝毫不安——只是略微有点点不安——所以每当他们看见报纸上提到 CP，他们就问什么是 CP。于是，关于科学和现代社会的关系，一个有趣的问题是：既然那么多的知识他们不能用，为什么他们还能够在这个现代社会里这么可悲、愚昧甚至有点快乐地生活下去？

附带说一下，关于知识和惊奇，伯纳蒂尼先生说我们不该传授惊奇，我们该传授知识。

知识和惊奇的意思应该不同。我认为我们应该教给人们惊奇，而且知识的目的也正是为了更多地欣赏惊奇。知识正是要把自然的奇迹放进一个正确的框架。不过，他也可能认为我只是把一些单词搬来搬去，认为单词的意思流入了争论。总之，我想回答这样的问题：在现代社会里，为什么人们能够保持这么可悲的无知，而同时又不会陷入困难？我的答案是：科学（与社会）不相干。稍后我再来解释我的意思。不是它不得不这样，是我们让它与社会不相干。我后面

还会回到这个论点上。

除了它的应用以及它所发现的事物真相之外，科学还有另一些重要的方面涉及它与社会的关系，这就是观念以及科学探索的技巧——如果你愿意，也可以称之为方法。因为我很奇怪，这些自明的、显而易见的方法，为什么没有早点儿被发现？那些简单的观念，其实只要你去尝试尝试，你就能看到结果，等等。也许人类的心灵已从动物的心灵超越出来了，它（人类心灵）进化成一种特定的模式，但是就像一切新工具一样，它也有它的毛病和困难。人类特殊的心智也有它的麻烦，麻烦之一是，它被自己的迷信污染了，心灵迷惑了它自己。科学方法的发现最终为人类的心灵找到了一条路，使之有那么一点儿上了轨道，于是科学家才能够在某些方向上取得一点小小的进步，而不是四处兜圈子，把自己逼进死胡同。我相信，今天无疑是讨论这个问题的一个合适时机，因为这种新发现正是从伽利略时期开始的。你们当然都知道这些观念和方法，下面我只回顾一下它们。对普通的听众你也许需要进入细致的细节，但是我只是提一下，以便你们能集中注意我现在要讨论的主题。

首先是检验证据——噢，第一件事实其实是，在开始之前，你一定不知道答案。所以你是在不知道结果会如何的情况下开始工作的。这一点非常、非常重要，我得在这个方面多花些时间，深入地说说这个问题。开始的时候，必须要持怀疑和不确定的态度，因为如果你已经知道了答案，就没什么必要去收集证据了。因为不能确定，所以下一步的事情就是去寻找证据。科学的寻找证据的方法，是从试验开始。但是另外一个方法，另外一个十分重要、十分关键的方法也不能忽视，这就是：汇合各种想法，尝试着在你所知的各种不

同事物之中寻求逻辑的一致性。把不同方向上的想法汇合起来，把你所知道的这件事和你所知道的那件事联系起来，看看是否一致。这种努力是非常有价值的，在这方面越积极越好。

寻找证据的工作完成之后，我们得检验证据。关于检验证据，有一些常规。你不能只挑你喜欢的证据，你得考虑所有的证据以维持某种客观性——足以让检验进行下去——而不是完全依赖权威。权威也可能是引领你走向真理的一个暗示或线索，但它不是信息的来源。无论何时，只要它与我们的观察不相符，我们就该抛弃它。最后，结果的记录应该不带任何的倾向性。“不带任何倾向性”，这是个很有意思的短语，一直让我很疑惑——因为它意味着：一个人虽然全身心投入了这个事情，但是他却不能对事情的结果做任何修补。在这儿，无倾向性的意思是：你所做的报告，必须避免有意识地把读者引向某个与证据所示不相同的观点。

我想你们都会赞成我上面所说的这些。

所有这些，所有这些观念，所有这些方法，都在伽利略的精神之中。这个人，我们现在正在庆祝他的诞辰，他对这些观察事物的方法的发展、传播做出了巨大的贡献，最重要的是，他以自己的工作证明了这些观察方法的力量。在百年纪念或一百五十年纪念的时候，人们总会产生这样的感想：我在想，如果这个人现在站在这儿，我把现在的这个世界展示给他看，他会说什么呢？当然，你们会说那是个老生常谈的话题，你不该在一个演讲中说这个老生常谈的话题。但是，这正是我现在就要说的话题。设想一下，伽利略就在这儿，我们把今天的这个世界展示给他看，取悦他，或者看看他从中发现什么。我们告诉他有关证据的问题，他所发展的

那些检验证据的方法。我们也会特别指出，我们现在仍然准确地守着那同样的传统，一步不离地追随着它——甚至于某些细节的方面，比如我们仍然进行数字测量并以之为一种相对较好的工具，至少在物理学领域是这样的。还有，在他的那个精神之下，科学已经直接并且持续地由他最初的观念发展壮大了。而作为这种发展的一个结果，是这里再也没有巫婆和神灵。

确实，定量测量的方法在科学上非常有效，今天它几乎已经成为科学的一个定义了。伽利略曾经为之殚思竭虑的科学，如物理学、力学等等，无疑已经发展了，不仅如此，这些方法还被用于生物学、历史学、地理学、人类学等等学科。正是通过这些相似的方法，我们知道了许多人类的历史，动物的历史和地球的历史。相同的系统还用于经济学，并在一定程度上取得了类似的成功——因为一些困难，所以不是完全的成功。但是也有些领域，这些方法只是形式上说说而已，有许多人仅仅是拿这方法走过场。让伽利略先生知道这些，我该感到羞愧，但是——比如在社会科学方面——它的效果确实不是很好。举例来说，我个人的经验——正如你们所了解的，我们对教育方法，特别是算术的教学正在进行着大量的研究，但是如果你想找出一个真正杰出的关于“某种算术教法比其他教法更好”的研究，你会发现，我们虽然有无数的研究，有大量的统计，但是它们全都互不相干，不过是些趣闻、无控制的试验和控制得十分差的试验的混合罢了，几乎没有什么有价值的信息。

最后，我想向伽利略展示一下我们的世界，我一定要怀着巨大的羞愧向他展示一些事情。如果我们把目光从科学身上移开，看看我们周围的世界，我们发现一些很遗憾的事

情：我们所生活的这个环境是如此、如此严重地不科学。伽利略会说："我宣告过丘比特是个有卫星的球，而不是天上的神。请你们告诉我，星相家们究竟怎么了？"他们把他们占卜的结果印在报纸上，至少在美国，每一天的每一种日报上都印着他们占卜的结果。为什么直到今天还有星相家？怎么会有人写这么本书，比如《冲突的世界》？这作者的名字以"V"开头，是个俄国人的名字，啊？Vininkowski？*这本书怎么流行起来的？所有这些关于玛丽·布洛迪（Mary Brody）的废话究竟是些什么？我不知道，那都是些荒唐的东西。这里总有些荒唐的东西。这里有不可胜数的荒唐的东西，换句话说，这环境非常非常严重地不科学。人们还在谈论心灵感应，尽管它正在消亡。这儿有许多信仰治疗，到处都是。这儿有一个信仰治疗的完整宗教，在信仰治疗仍在继续的卢德**就有这样一个灵迹。那么，占星术也许真的是正确的，你在火星位于对着金星的直角上的那天去看牙，也许真的比其他日子去看牙更好。也许卢德的灵迹真的能够治好你的病。但是如果那是真的，我们就该去调查它，研究它。为什么？为了改进它。如果那是真的，那么我们也许能够证实星星是否真的对生命有影响；通过统计学的调查，通过更仔细地、科学地、客观地检验证据，我们也许可以使那系统更有力量。假如卢德的治疗程序果真有效，那么就有这么一个问题：病人该站在距离灵迹所在位置多远的地方呢？他们是否真的犯了个错误，以至后排确实没有什么效果？或者效果如此之好，以至灵迹附近有大量的空间可以安排更多的

---

* 实际上是 Immanuel Velikovsky《冲突的世界》（双日出版社，纽约，1950）。——编者

** Lourdes，法国南部上庇里牛斯省的小镇，临于波河，因传闻圣女玛利亚在此显灵而闻名世界。——译者

人？这可能么？比如，依靠近来在美国被封为圣徒的人——有一个圣徒明显间接地治愈过白血病——连着病人床单的丝带提高了白血病的治愈（丝带此前已接触了圣徒的某些遗物）。问题是，丝带的魔力是不是逐渐减弱？你可能要笑，但是如果你相信信仰治疗的真理，那么你就有义务去研究它，去提高它的效率，使它令人满意而无欺骗。比如说，也许事实证明接触一百次之后，它就不再起作用了。然而也可能这调查会有其他的结果，就是说，根本就没那么回事！

另一件困扰我的事我也要提一下，那就是，现代的神学家们竟然能够讨论一些事情而不感到羞耻。有许多事他们可以去讨论而不必感到羞耻，但有些在宗教研讨会上被讨论的事，以及那些不得不做出的结论，在现代真是荒唐可笑。我想，其中的困难之一，也就是这种状况何以能够持续下去的原因之一，是人们没有认识到，只要这些事情中有一件事情的一个例子真的起了作用，我们的世界观将会有怎样一个根本的改正。如果你能够建立真理，不是整个星相学观念的真理，而只是一个小点，这整个星相学观念将对我们对世界的理解产生巨大的影响。我们之所以能够一笑置之，是因为我们对自己的世界观如此自信，我们确信他们不可能有任何贡献。换一个角度看，我们为什么不铲除它呢？我将解释为什么我们不马上铲除它，这是因为——如我前面所说——科学与星相学不相干。

现在我要说说疑问稍微大一点点的另外一件事情，（尽管有疑问）但是我仍然相信，在检查证据，报告证据等等时候，科学家们感觉到他们相互之间有一种责任，你也可以称这责任为一种道德。什么样的方法是报告结果的正确方法，或错误方法？不要带任何倾向，让别人自由地去明确理解你

所说的，也就是说，尽量不要把你自己的意愿加诸其上。这非常有用，可以帮助我们相互理解对方。实际上，我们不是在一个纯粹是个人嗜好的路上前进，而是为了理念的普遍进步，这是非常有价值的事。所以你得承认，这里有一种科学道德。虽然不抱什么希望，但我仍相信，这种道德应该大大推广；相比于这种科学道德，那些诸如宣传的事情，就应该是个肮脏的词语。一个由另一个国家的人所做的关于这一个国家的描述，应该公正无私。这是怎样一个奇迹——比卢德的奇迹还要坏！例如，广告就是一个例子，它是对产品不科学不道德的描述。这种不道德无所不在，以至于人们在日常生活中已经对它习以为常了，以至于你已经不觉得它是件坏事了。所以我想，我们要加强科学家和社会其他人群的联系，一个重要的原因，就是向他们解释——在某种意义上，也是唤醒他们——使他们意识到，不接受信息，或者总是带着私情去接受信息，是对我们心智的不可恢复的消磨。

还有其他一些事，科学的方法对它们也会有些价值；这是显而易见的，但也变得越来越难以讨论——比如决策的事情。我的意思并不是说应该用科学的方法去做决策，就像在美国让兰德公司*坐下来做算术运算那样。这让我想起大学二年级的时候，我们发现在讨论女人时，通过使用电学的术语——阻抗，磁阻，电阻——我们就对那状况有了更深的理解。在今天的世界上，另一件让科学家毛骨悚然的事，是各个民族选举领导人的方法。比如今天的美国，两个政党都决定聘用公关人员，也就是广告人员，这些人出于推销某种产品的目的，专门学习说理和撒谎的必要方法。这不是选举的

* Rand Company 美国一家著名的政策咨询公司、智库。——译者

初衷。他们本该去辩论问题，而不是只制造口号。但是事实上，如果你回顾一下历史，美国政治领导人的选举上已经有了许多立足于口号的例子。（我敢肯定，现在每个党政都有上亿元的银行存款，我也相信他们都会有些十分聪明的口号。）但是现在我无法总结所有这一切。

我一直在说科学是“不相干”的。这听起来怪怪的，我想回过头去再说说这个问题。它当然是相关的，因为事实上它与星相学相关；因为如果我们以我们一贯的方法来理解这世界，我们无法理解占星现象是怎么发生的。所以这是相关的。但是对于那些相信占星术的人来说，科学又是不相干的，因为科学家从不骚扰他们，从不跟他们争论。而相信信仰治疗的人也根本不必担心科学，因为没人会去和他们争论。如果不喜欢科学，你可以不学它。所以，如果你觉得科学带给你太多的精神上的压力——通常是这样的——你可以把它整个儿抛到一边去。为什么你可以把这一切抛到一边去呢？因为我们科学家不会对你的行为采取什么行动。我坚信，我们必须攻击那些我们不相信的事情。不是用砍头的方法去攻击，而是用辩论的方式去攻击。我相信，我们应该要求人们尝试着用他们自己的心智，去为他们自己获得一个自己世界的更为一致的图景。他们不该这么奢侈，把自己的脑子分成四片，或者两片，在这一边相信这个，在那一边则相信那个，而从来不想把这两边的观点比较比较……他们不该容忍自己这么奢侈。因为我们已经知道，如果我们把自己脑子里所有的观点放在一起比较比较，经过这个努力，我们在理解自己——我们在哪儿，我们是什么——以及欣赏自己等等方面就会取得一些进步。我也相信，科学之所以至今还停留在“不相干”的状态，是因为我们一直在等待，直到有人

来问我们问题，直到有人邀请我们去给那些连牛顿力学都不懂的人做一场爱因斯坦理论的报告，但是从未有人请我们去攻击一下信仰治疗，或占星术——从未有人请我们去讲“今天的科学如何看待占星术？”

我想，我们一定要重点写一些文章。如果我们这样做了，会有什么效果呢？因为你来我往的争论，相信占星术的人就不得不去学一点天文学，相信信仰治疗的人可能也就不得不去学一点医学和生物学。换句话说，科学成为相干的也就势所必然了。我曾经读到过一个评论，说科学只要不攻击宗教就没错。这为我提供了一个理解（科学的）问题所需要的线索。（顺着这个思路下去，）只要它不攻击宗教，它就没有受关注的必要，也就没有人被迫要去学习它。于是除了应用，它就被从现代社会中切除出去，孤立了起来。然后我们就陷入了可怕的挣扎，挣扎着向人们解释他们不需要知道的东西。但是，如果是他们想要维护自己的观点，那么，他们就不得不学一点点你的东西。所以我提醒诸位——也许我的这个想法不对，或者根本就是错的——我们太绅士了。过去有段时期在这些问题上曾有过争论。过去教廷曾觉得伽利略的观点是对教廷的攻击；但是今天的教廷却没有觉得科学的观点是对教廷的攻击。没有人为此担心。没有人攻击我的意思是，没有人试图写文章解释今天的人们所接受的神学观点和科学观点之间的矛盾——有时候甚至是同一个科学家身上的宗教信仰和科学信仰之间的矛盾。

下一个话题，也是我今天要谈的最后一个主要话题——不确定性和怀疑的问题——我认为它是真正最重要、最严重的一个主题。我们都知道，科学家从来不“确定”。我们知道我们所有的陈述都是近似的陈述，只有不同程度的真实。

当我们做一个陈述时，问题不是这个陈述对或错，而是它能对到什么程度或错到什么程度。“上帝存在吗？”“如果把它变成疑问的方式，会怎么样呢？”这使宗教的观点发生了个可怕的转变。这就是宗教的观点为什么不科学的原因。我们必须在许可的不确定性范围内讨论一切问题；只是随着证据的积累，“也许某个观点是正确的”这种可能性才或者增强，或者削弱。但是科学绝不会做出这样或那样的彻底肯定。现在我们知道，为了能够进步，这一点是最最重要的。我们一定要留下怀疑的空间，否则就不可能有进步，不可能有学习。如果不是不得不提出问题，就不会有学习。而问题需要怀疑。人们寻求确定性，但世上却没有确定性。人们因此感到恐惧——你怎么能够生活在不知道之中呢？其实这一点也不奇怪，因为实际上你仅仅是认为你知道。你大部分的行为都是建立在不完全的知识之上的，你并不是真的知道它是怎么回事，或者世界的目的是什么，或者大量其他的事。在不知道中生活，这是可能的。

怀疑的自由——对科学的发展来说这是绝对关键的——是从与教廷的不断斗争中诞生出来的，那时的教廷具有解决各种问题的权威。伽利略是那场斗争的象征——他是最重要的战士之一。虽然伽利略公开宣布放弃自己的思想，但他的忏悔显然是被迫的，没有人把这当回事。在这方面，我们没有必要效仿伽利略，我们没有必要都去发表申明放弃自己的思想。实际上，我们认为那种申明很愚蠢——我们一次又一次看到教会要求这样一个愚蠢的申明。我们很同情伽利略，幸运的是，这样的事情近来显然少些了。但是，不管他们筹划得多么聪明、多么漂亮，这种公开的忏悔其实是件很无谓的事情，在外面的人看来，根本不值得关注。伽利略的忏悔

不需要我们去讨论，这忏悔除了证明“伽利略也许是老了”以及“教会的势力很强大”之外，不能证明任何关于伽利略的问题。伽利略是否正确，这不是我们这个讨论的关键；教廷一直试图压迫他，这个事实才是我们这个讨论的关键。

我们看着这世界，我们看到，与我们所感觉到的人类的潜能相比，我们所取得的成就是如此之少，这让我们大家感到悲哀。先人们曾经在他们那个时代的噩梦中梦想着未来。现在，先人们所梦想的未来已经实现了，我们看到，他们的梦想在许多方面已经被超越了，然而在更多的方面，我们今天的许多梦想也正是先人们曾经有过的梦想。过去，人们曾经对解决问题的这种或那种方法充满热情，其中之一是公共教育。他们认为教育应该普遍化，这样的话我们每个人都可以成为伏尔泰（Voltaires），我们就可以解决所有的事情。普遍教育也许是件好事。但是你可能把人教好，也同样可能把人教坏——你可能教谎言，也同样可能教真理。另一个是交流。当通讯的发展已超出科学技术发展的层面时，国家之间的交流应该能够切实地改善国家间的关系。但是这也要看你传达什么，因为你可以传达真理，也可以传达谎言。你可以传达威胁，也可以传达善意。人们曾经奢望科学的应用能够把人从物质斗争中解放出来，特别是在医学中，科学似乎都在起好的作用。确实如此，但是当我们在这儿谈论的时候，科学家们却正在隐藏着的秘密实验室里极其所能地发展别人治疗不了的疾病。也许今天我们有这样的梦想，以为经济的满足就等于问题的解决，我的意思是，每个人都应该有足够的物质财富。当然，我说这些话的意思，并不是说我们不该发展教育，并不是说我们不该交流，也并不是说我们不该追求经济的满足。但是如果说仅仅靠它就可以解决问题，就可

以解决所有的问题，这是值得怀疑的。因为在那些已经有相当程度的经济满足的地方，我们有了一大堆新问题，或者，也许还是那些老问题，只不过因为我们恰好对历史有了足够的了解，所以那些问题在我们眼里看起来就有些不一样了。

所以今天我们不是很幸运，没有什么迹象让我们觉得自己已经做得十分出色了。人们，一切时代的哲学家，已经尝试着去发现存在的秘密，存在的所有意义。因为如果我们能够发现生命的真正意义，那么所有这些人们的努力，所有这些人类的奇妙潜力，就可能在一个正确的方向上展开，我们就能取得巨大的成功，向前迈进。我们因此尝试了这些不同的观念。但是整个世界的意义、整个生命的意义、整个人类的意义，等等问题，已经被无数的人回答了无数次。不幸的是，所有的答案都不相同，接受这种答案的人们震惊地看着接受另一种答案的人们。震惊——因为他们看见可怕的事情正在发生，他们看到这个关于世界的意义的僵硬观点正把人推进死胡同。实际上，可能正是因为这巨大的震惊，才使人们看清人类的潜力竟是如此的巨大。真的有这种可能，真的可能正是这种震惊给了我们希望：假如我们能够在正确的方向上做事情，事情就会好得多。

那么，整个世界的意义是什么？我们不知道存在的意义是什么。通过研究已有的所有观点，我们得出结论说：我们发现我们不知道存在的意义。但是在这么说的时候，我们也许已经发现了一条通途——如果我们在前进当中只承认“我们不知道存在的意义”，那么我们就会愿意给其他选择留下公平的机会，我们就不会变得对事实、知识、绝对真理那么热心，而是保持一贯的开放性——也就是说，我们会“冒冒险”。英国人就是在这个方向发展了他们的政府管理，他们

称之为“混过去”。尽管听起来很蠢，很笨，但是这确实是最科学的前进道路。选定答案是不科学的。为了进步，你的门必须给未知留一条缝。我们还处在人种发展的起始阶段，还处在人类心灵发展的起始阶段，还处在智慧生命发展的起始阶段——我们未来还有许多许多年。我们不能在今天为一切给出答案，把所有人驱进一个方向，说“这是它的全部答案。”如果这样，我们就会被我们目前有限的想像力束缚住，我们就只能做那些我们认为今天要做的事。相反，如果我们在一条类似于科学的道路上前进，总是给怀疑留一些空间，给争论留一些空间，那么这些困境就不会出现。这是我们的责任。因此，我相信这一天总会到来，我希望到那时人们普遍能够同意：政府的权利应该得到限制；政府不应有权决定科学理论是否有效，他们试图这么做是很可笑的；他们不要去干预关于历史的各种描述，或关于各种经济理论或哲学的描述。虽然今天的实际情况还不是这样，但我相信这一天总会到来。只有这样，未来人类的所有潜能才会最终发挥出来。

5 肯定还有大量的空间

1959 年 12 月 29 日，费曼——“纳米技术之父”——在加利福尼亚理工学院向美国物理学会发表了一个著名的演讲。在这个演讲中，费曼阐释了小型化的前景，这个思想领先于他的时代数十年：如何把整个《大英百科全书》放到一根针头上；生物对象和非生物对象尺寸猛然缩小；以及润滑机器的问题，当然这机器比这页书上的句点还要小。费曼打了个著名的赌，向年轻的科学家挑战，要他们制造一个能运转的电动机，其各边的尺度不超过 1/64 英寸。

邀请你进入物理学的一个新领域

我以为，实验物理学家们一定常常用嫉妒的眼光看着像卡默林·昂内斯 *这样的人，他发现了低温这样一个领域，这个领域似乎没有底，你可以在里面一直探索下去。这样的一个人，就会成为某个科学探索中的领袖，而且是一时的霸主。珀西·布里奇曼 **则因为设计了一个获得高压的方法而打开了另一个新的领域，他成功地转入这个领域并一直引领着我们。高真空方面的发展是这方面的持续发展。

我想介绍一个领域，这个领域还没有什么发展，但是原则上这个领域里有无数可做的事情。这个领域和其他领域不太一样，它不会给我们讲许多基本物理（像“什么是奇异粒子？”这类问题），但是它会告诉我们许多在复杂情形下发生的很有意思的奇怪现象，在这一点上它很像固态物理。此外，最重要的一点是，它在技术上会有非常多的应用。

我要谈的是如何在小尺度上处理和控制事物的问题。

我一提到这个问题，人们就跟我讲小型化的事，以及我们今天在小型化方面已经取得的进步。他们跟我讲电子电动机，只有你小指的指甲那么点大。他们告诉我，市场上还有一种装置，利用它你可以在针头上写下“天主经”。但是那根本算不了什么；放在我所要讨论的这个发展方向上，那只是最初级的、摇摇晃晃的一步。在它的下面，还有一个令人

---

* Heike Kamerlingh-Onnes（1853~1926）荷兰物理学家，因为研究低温下物质的性质并研制出液氦（1908），获 1913 年诺贝尔物理学奖。——编者

** Percy Bridgman（1882~1961），因为发明产生超高压的装置及其在高压物理领域的进一步研究，获 1946 年诺贝尔物理学奖。——编者

惊愕的小世界。到2000年，当他们回顾我们这个时代时，他们会很迷惑：为什么直到1960年才开始有人正式转入这个方向！

为什么我们不能把整个24卷《大英百科全书》写在一个针头上？

我们来看看这涉及哪些问题。针头有十六分之一英寸那么宽，如果把它的直径扩大25000倍，针头的面积就和《大英百科全书》所有页面的面积相当了。因此，我们所需做的一切，就是把《大英百科全书》中所有内容的尺寸缩小25000倍。这可能吗？人眼的分辨率在1/20英寸左右——这大约是《百科全书》中精美的网目版复制品上那些小点子的直径。你把这小点点缩小25000倍，其直径也是80埃*——32个普通金属原子的宽度。换句话说，一个这样的点，其面积仍然可以容纳1000个原子。所以，以光镂（照相雕刻）的尺度要求来衡量，每个点还是很容易进行校正的；一个针头上有足够的空间安置整个《大英百科全书》，这也是毫无疑问的。

再者，如果真的这样书写，这《大英百科全书》也是可以阅读的。我们想象这书是用金属的浮雕字母写成，也就是说，在《百科全书》上空白的地方，是浮雕的金属字母，其大小仅仅是通常尺度的1/25000。这么小的字母怎么阅读呢？

如果我们把一些东西写成这个样子，我们可以用我们今

* 1埃=百亿分之一米。——编者

天常用的技术来阅读它。（毫无疑问，如果我们真的这么写，人们将会找到更好的方法来阅读它，但是为了保守一些，我只使用我们今天所知道的技术。）我们把金属压进塑料物质，做一个模型，然后很细心地把塑料剥离下来，再把硅土蒸发进塑料，形成很细的胶卷，然后与硅土成一个角度把金蒸发进去进行显影，让所有字母清晰地显现出来；把塑料从硅土胶卷上溶解掉，然后通过一个电子显微镜来看胶卷！

把一个东西缩小25000倍，以浮雕字母的形式写在针头上，对今天的我们来说，阅读这样的东西一点也不困难——这是没有问题的。我们还会发现，如果这样的话，作品的复制也变得很容易，只需把同样的金属板压进塑料，就得到另一份拷贝了——这也是没有问题的。

如何写得小？

下一个问题是：我们怎么来写？目前我们还没有标准的技术来完成写的任务。但是我们可以说，这并不像初看起来那么难。我们可以把电子显微镜的镜头翻转过来，由放大变成缩小。从翻转的显微镜头发送出来的离子源，可以聚焦在一个很小的点上。我们可以用这个点进行书写，就像在电视的阴极射线示波器上书写一样，逐线扫描，并有一个调节器，由它决定我们在进行线扫描时沉淀多少量的金属。

因为空间电荷的限制，这种方法可能很慢。我们会有更快的方法。首先我们也许可以通过某种光学处理造一个屏，上面以字母的形式留有孔。然后我们在孔后打一个弧，让金属离子穿过孔。然后再用我们的镜头系统，以离子形式成一

个小影，它可以把金属沉淀到针上。

一个简单些的途径可能是这样的（虽然我不能肯定这会不会有效）：我们让光反向通过一个光学显微镜把光线聚焦在一个很小的光电子屏幕上。屏幕上被照亮的地方就会有电子跑出来，这些电子被电子显微镜镜头汇聚并直接撞击到金属的表面。我不知道，如果这样一束电子的路程足够长的话，它能否蚀刻金属？但是如果它对金属表面没有效果，我们肯定可以找到其他材料来包裹针头，这样，在电子撞击的地方就会留下可以辨认的痕迹。

这里没有密度问题——不是像你在放大时常做的那样，在那儿你捕获数个电子并把它们扩散到一个很大很大的屏幕上。这里恰恰相反，我们要把从页面上取得的光线集中到一个很小的面积上，所以光线很密集。同样，从光电子屏幕上跑出来的电子被汇聚到一个很小的面积里，所以它们也很密集。我不明白人们为什么至今还没有做这些事情。

这只是把《大英百科全书》放到针头上，但是我们来考虑一下世界上所有的书。国会图书馆大约有 900 万册；英国博物馆图书馆有 500 万册；法国国家图书馆还有 500 万册。毫无疑问，世上还有许多副本，所以我们可以说世界上值得读的书有 2400 万册。

如果以我们刚刚讨论过的尺度把所有这些书都印下来，结果会怎么样呢？需要多大的空间？当然是 100 万个针头的区域，因为现在不是 24 册百科全书，而是 2400 万册图书。百万个针头的面积，相当于一千根针侧躺时所占的面积，或 3 平方码的面积。那就是说，以极薄的塑料为衬背的硅复制品——我们用来做拷贝并储存所有这些信息的硅复制品——其面积大约是 35 页百科全书的大小。这大概是半本杂志的

页数。全人类曾经记载在书里的所有信息，可以纳进你手里的一本小册子让你随身携带——而且不是编码书写，而是原始图片、雕版等所有东西的一个简单的小复制品，分辨率不受影响！

我们加利福尼亚理工学院的图书馆，当“她”忙着从这个建筑搬到那个建筑时，如果我告诉她，从现在起的十年时间内，她现在使尽力气想要记住的所有信息——从地板堆到天花板的 120000 册书，装满卡片的抽屉，塞满旧书的储藏室——所有这些信息可以储存在一张图书卡片上，她将如何惊讶！举个例子来说，巴西大学的图书馆烧掉了，数小时之内我们就能够从那个主板上复制一个拷贝下来，里面容纳有我们图书馆里的每本书的复制品，然后我们把这个拷贝放在一个信封里寄给他们，这信的大小和重量都不超过任何一封普通的航空信。

好，我们这个讲演的题目是“肯定有大量空间”——而不是“肯定还有空间”。我前面所证明的是“有空间”——即你可以用一个现实的方法缩小物体的尺寸。我现在要向你证明“有大量空间”。我现在不讨论我们怎么去做到这一点，而只讨论在原则上有什么样的可能——也就是说，就物理原理来看，有什么可能。我不是在发明反重力，那种情况只有在某一天物理原理不是我们所想的那样时才有可能。我所要告诉你们的，是在我们现在所承认的物理原理之下，我们所能做的，而我们之所以没有做，仅仅是因为我们还没有去接触它。

小尺度信息

假设一下，我们不直接按照图片以及所有其他信息的当前形式进行复制，而是仅仅把信息内容写成点和短线组成的代码或者类似的什么东西，以此来表示不同的字。每个字代表六或七个信息单元，也就是说，每个字你大概只需六或七个点或短线来表示。这样的话，我就可以利用金属内部的内容来书写信息，而不是像前面所做的那样，把一切东西都照原样复写到针头表面。

我们以一种金属的小斑点表示一个点，以相邻的另一种金属小斑点表示一个短线，等等。假设——保守一点说——一个信息元需要一些原子组成的一个小小体积，$5 \times 5 \times 5$——即 125 个原子。也许，为了保证不在扩散或其他过程中丢失信息，我们需要一百零几个原子。

我已经估算了《百科全书》中有多少个字，也已经假定了 2400 万册书中每册书的大小相当于一册《百科全书》，然后也计算了总共有多少个信息元（10^{15}）。每个信息元我预备 100 个原子。计算的结果是，以这种形式，人类细心积累在世上所有书籍里的所有信息，可以写在一个边长为两百分之一英寸的金属立方体里——其大小仅仅相当于一片人眼所能分辨的尘埃。因此，确实有大量的空间！不要说什么微缩胶片！

这一事实——巨量的信息可以放在一个极小的空间里——生物学家当然很熟悉，这解释了此前一直存在的一个秘密：一个复杂生命体，比如我们自己，是如何把它的所有信息储存在最小的细胞里的。所有这些信息——我们会不会

长一双褐色的眼睛，或者我们能不能思考，或者在胚胎里，颚骨应该首先发育，边上带着小孔，以便稍后生长的神经可以伸过去——所有这些信息，全部以 DNA 分子链的形式保存在细胞的一个小小片断里，在这里面关于细胞的每个信息元大概使用 50 个原子。

更好的电子显微镜

如果我以代码来书写，每个单元用 5×5×5 个原子，接下来的问题就是：我们今天怎么阅读它？今天的电子显微镜还不够好，因为它竭尽全力，也只能分辨到 10 埃。所以我在给你们讲所有这些小尺度事物时，我得努力让你们明白，把电子显微镜的分辨率提高 100 倍是非常重要的。这不是不可能的，这并不违背电子衍射定律。这样的一个显微镜里，电子的波长只有 1/20 埃，所以应该是可以看到单个原子的。能够清楚地看到单个原子，这有什么意义呢？

我们在其他领域有些朋友——比如说生物学领域。我们物理学家经常瞧着他们说，“你们知道为什么你们这些人（在研究上）几乎没有什么进展吗？”（实际上，我不知道还有其他什么领域所取得的进展比今天的生物学还快。）“你们应该多用点儿数学，像我们这样。”他们可能这样回答——但是他们太谦虚了，所以我来替他们回答：“为了让我们能够取得更迅速的进展，你们首先应该把电子显微镜改进 100 倍。”

今天的生物学，其最核心、最根本的问题是什么？是这样一些问题：DNA 中的基本序列是什么？如果你有个基因突变，会怎么样？DNA 和蛋白质中氨基酸序列相联系的基

础序列是什么？RNA（核糖核酸）的机构如何，是单链的还是双链的？它的基础序列是如何与 DNA 相联系的？微粒体的构成如何？RNA 哪儿去了？它是怎么排列的？蛋白质位于什么地方？氨基酸进了什么地方？在光合作用中，叶绿素在什么地方，是怎么安排它的？在这过程中，哪儿牵涉到类胡萝卜素？把光转变成化学能的系统是什么？

这些基础的生物学问题，有许多是很容易回答的；你只需去看那东西。你会看到链中的基本序列；你会看到微粒体的结构。不幸的是，目前的电子显微镜所能看的尺度有点儿过于粗糙了。如果显微镜的功能再强 100 倍，生物学的许多问题就要简单多了。当然，我说得有点夸张了，但是如果这样，生物学家确实会很感激你——而且他们也会乐于接受你的批评，“应该多用点数学。”

在今天，关于化学过程的理论是建立在理论物理的基础之上的，在这个意义上，是物理学为化学提供了地基。但是化学也有分析。如果你得到一种陌生的物质，你想弄明白它是什么，你就得经过一个长长的、复杂的化学分析过程。今天你可以分析几乎所有的东西——所以我的想法有一点点迟到了。但是，如果物理学家想去做，在化学分析的问题上，他们还是可以在化学家们的工作的下面进行挖掘。不管什么复杂的化学物质，对它进行一个分析是很容易的，你所需做的不过是观察它，看原子在什么地方。现在唯一的困难，是电子显微镜的分辨率还差 100 倍。（稍后我会问这么一个问题：物理学家能不能在第三个化学问题——也就是化合问题上有所作为？有没有一个物理的途径来化合化学物质？）

电子显微镜之所以太差劲，是因为它镜头的 f-值只有 1/1000，你没有一个足够大的数字孔径。而且我也知道，有

定理表明，用轴对称稳定场镜头不可能产生比这个更大的 f-值，所以目前的分辨率已达到其理论的最大值。但是，任何理论中都带有假定。为什么场一定要是对称的？我这里提出一个挑战：真的没有办法可以使电子显微镜更强大吗？

不可思议的生物系统

生物学上小尺度书写信息的事例，刺激着我去思考某些可能的事情。生物不是简单地书写信息；它是在做一些事情。一个生物系统可能非常非常小。许多细胞也非常小，但它们很活跃；它们制造各种物质；它们四处游走；它们摆动；它们做各种不可思议的事情——都是在一个非常小的尺度上。另外，它们也储存信息。请考虑一下这样一种可能：我们也能够造一个非常小的东西，让它照我们的意愿做事——即我们能够制造一个在生物学尺度上活动的东西。

把东西造得非常小，这还有一个经济学上的意义。我来帮你们回忆回忆计算机的一些问题。在计算机里，我们得储存大量的信息。我前面所提到的一种书写方式，即把所有东西都降低为一个金属分布，那是永久性书写。但是一个计算机的书写方式要有趣得多，它书写，抹掉，又书写其他的内容。（通常都是这样的，因为我们不想浪费掉那些已经写上内容的材料。然而，如果我们能够把内容写入一个很小的空间，重复使用就没有什么意义了——读完之后可以直接扔掉它，因为它很小，不会费很多的材料。）

把计算机微型化

虽然我不知道在实践上怎样以小尺度的方式进行重复书写，但是我确实知道（我们现有的）计算机非常大，它们塞满整个房间。我们为什么不能把它做得非常小？用小电线，小元件——小……我的意思是“小”。比如，电线的直径应该为 10 或 100 个原子，线路应该只有数千埃宽。所有曾经分析过计算机的逻辑原理的人已经得出了结论：如果计算机能够造得更复杂些，比现在的复杂数个数量级，那么在这计算机上可能发生的事情将非常有趣。如果它们有百万倍多的元件，它们就能够作出判断；它们将有时间去计算最好选择哪种方法去完成所要进行的运算；它们会根据自己的经验，选择一个分析方法，比我们所提供的那个方法更好，等等。在许多其他方面，它们还会有一些新的性能。

看见你的脸，我立即就能认出这是我以前曾经见过的。（实际上，我的朋友们会说我在这里选择这个例子来做证明是很不幸的。至少我能判断这是个人，而不是个苹果。）然而迄今为止我们还没有一个机器能以这么快的速度摄入一张脸的图片并且判断出这是一个人，更不用说判断出这是你曾经向它展示过的那个人了。如果这张脸发生了变化，如果我离它近了一些或远了一些，如果光线变了——不管怎样，我总能认出它来。现在我们来看看这个事实：我脑壳里面的这个小计算机很容易做到这些，而我们制造的计算机却不能做这些事。我头骨里面的元件数目，要远远大于我们“神奇”的计算机里面所具有的元件数目。但是我们的机械计算机太大了，而这个脑壳里的元件却都要显微镜才能看见的。我希

望能造一些“亚”显微镜的机器。

如果我们想（按照现有的方式）制造一台具有所有这些额外的奇妙性能的计算机，我们也许不得不把它造得有五角大楼那么大。首先，它需要太多的材料，我们也许没有那么多锗来制造这个庞然大物所需要的所有晶体管。还有发热和能量消耗的问题；另外，我们也许需要田纳西流域管理局来运行这计算机。但是一个更实际的困难是，计算机的速度会受到限制。因为它的尺度很大，所以需要一定的时间把信息从一个地方传送到另一个地方。而信息的传播速度不可能快过光速——因此，最终，当我们的计算机变得越来越快的时候，我们就不得不把它做得越来越小。

但是在让它们变小这个方面，我们还有足够的发展空间。在物理定律里，我从来没有看到所谓计算机元件不能比现在的小太多这样的话。实际上，我们也许还有一定的有利条件。

通过蒸发作用实现小型化

如何才能造出这么一个装置呢？用什么样的制造程序？一种可以考虑的可能，也许是蒸发金属，然后在它旁边蒸发上绝缘体——我们前面已经说到通过对原子进行特定排列的方法进行书写——然后为下一层蒸发另一个电线位置，另一个绝缘体，等等。所以你只需进行蒸发，直到你得到一组东西，它里面的元件——镀锡卷板，电容器，晶体管等等都有极度精美的尺度。

但是我想来讨论一下——仅仅是为了娱乐——我们还有其他的可能。为什么不能像制造大计算机那样制造这些小计

算机？我们为什么不能完全在一个无穷小的级别上钻孔、切割、焊接、冲压、铸形？一个东西小到什么程度才无法铸造？界限在哪儿？（生活中，）在对付一些小得没法下手的东西时——比如你夫人的表带——你曾经多少次自言自语，“我只能训练一个蚂蚁来做这件事！”我的想法是，也许我们可以训练一个蚂蚁去训练一个小虫子来做这件事。那么，小而能活动的机器，有什么样的可能呢？它们也许有用，也许没用，但是制造这样的机器肯定很好玩。

拿一个机器——比如说，一辆汽车——然后问一问是否可以造，或者如何制造一个与它一样但尺度非常非常小的机器？假设在汽车这一特殊设计中，我们对部件有一个精度要求；我们要求一个精确度，比如说，精确到 4/10000 英寸。如果它们精确度太差，比如超过了活塞的形状，等等，它就不能正常工作了。如果我把这东西造得太小，我就得担心原子的尺寸；比如说，如果周长太小，就无所谓“球”的周长了。因此，如果我的误差能达到 4/10000，相当于 10 个原子，那么我就能把汽车的尺度缩小大约 4000 倍——它有 1 毫米那么宽。显然，如果你重新设计这汽车，使它能够在更大一些的公差下工作——这并非完全不可能——那么你就可以造一个更小一些的装置。

想想在这么小的一个机器里面会出现些什么样的问题，这是很有意思的。首先，各部分承受的应力相同，随着面积减小，力也减小，所以重力、惯性相对来说也就不重要了。换句话说，材料力相应地要大得多。比如，只有在旋转速度增高的比例与尺寸减小的比例相同时，由向心力引起的调速轮的应力和张力才能均衡。另一方面，我们所用的金属有一种颗粒的结构，在小尺度时这一点非常讨厌，因为材料不是

各向同性的。而塑料、玻璃等具有不定形性质的材料却有很好的同向性，所以我们也许不得不使用这类的材料来造我们的机器。

还有些问题涉及到这个系统的电子部分——涉及铜导线和磁体部分。磁的性质，在很小的尺度上和在大尺度上是不一样的。这里牵涉到“磁畴”问题。一个由数百万个“磁畴”构成的大磁铁，在小尺度上只能由一个“磁畴”构成。电子设备不能只是简单地缩小尺寸，它必须重新设计。但是为什么不能重新设计电子设备呢？我看不出有任何理由。

润滑问题

润滑牵涉到一些很有趣的事情。在我们减速时，油的黏性会成比例升高（如果我们尽可能地提升速度，会怎么样？）。如果我们不大幅度提高速度，并且把油换成煤油或其他液体的话，问题就不会这么糟了。然而实际上我们根本不需要润滑！我们有许多额外的力。干脆让轴承干转！它们不会发热，因为这样小的一个装置上热量散发得非常非常快。这种快速散热会阻止汽油爆燃，因此内燃机也不能用了。我们可以使用其他一些冷却时释放热量的化学反应，也许对这么小的机器来说，外挂的电源是最便利的。

这么小的机器有什么用途？谁知道？一个这么小的汽车当然只能由小微虫在里面驾驶；我想，我们基督徒还没有这样的兴趣。然而我们确实考虑过一种可能：用全自动化的方法——包括很小的车床及其他机械工具——来制造计算机内的小元件。那小车床不一定要和我们的大车床严格相像。我让你们自己去想象如何改进设计，以充分利用小尺度物体的

特性，而且这种设计要最便于实现全自动。

我的一位朋友，阿尔博特·R·黑布斯*，他为相对小些的机器提供了一个十分有趣的选择。他说在手术中让你吞下一个外科医生——虽然这是一个非常疯狂的想法，但也许挺有意思。你把机械医生放进血管，它沿血管进入心脏，然后四处“查看”。（当然，信息一定得反馈出来。）它查出是哪个阀门出了问题，然后用一把小刀切开它。还有其他一些小机器，可以永久性地植入体内，辅助一些功能不足的器官。

于是出来了这么一个有趣的问题：我们怎样来造这么小的一个机械？我留给你们自己去想。不过让我来提示给你们一种可能，一种有些不可思议的选择。你知道，在原子能车间里，有些物质和机器，他们是不能直接操作的，因为它们有放射性。他们会利用一套控制设备和机械手去做拧下螺帽和插入螺栓等等事情。也就是说通过操作这儿的一套控制杆，你就可以控制那儿的一些“手”，而且可以让它们这样那样地转来转去，非常优美地处理事情。

大多数这样的装置实际上都很简单。它有一根特殊的电缆，像一根木偶牵线，直接从控制台通向“手”。当然它们也需用伺服电动机，所以它们部分和部分之间的连接是电子的，而不是机械的。你转动控制杆时，它们就转动一台伺服电动机，这电动机改变电线里的电流，重新配置另一端的电动机。

现在我想制造大致相同的一个装置——一个用电来操控的“主-奴”系统。但是我希望这些“奴”是由现代的大尺度机械工精雕细琢出来的，这些“手”的尺度只有你平常所

* Albert R. Hibbs，费曼的一个学生，后来成为他的一个同事。——编者

用的四分之一大。于是你就有了一个系统，利用它你随意地在四分之一尺度上做事情——装备了小手的小小伺服电动机，拧着螺帽和螺栓；它们钻小孔，小四倍的小孔。啊哈！于是我造一个四分之一大的车床；造四分之一大的工具；然后我在四分之一尺度的工具上，又造另一套相对于此只有四分之一大的小手！从我的角度看，这是十六分之一的大小。完成这些之后，我把电线直接从我的大尺度系统——也许要经过一个变压器——接到十六分之一尺度的伺服电动机上。这样我就能够操作十六分之一尺度的手了。

从这儿你可以明白其中的原理了。这是个很难的项目，但是是可能的。你也许会说，我们的步子可以迈得更大些，远远超过 1 比 4 的比例。当然，这都是经过了精心设计的，而且也不必只是简单地把它做得像手。如果你非常仔细地思考思考，你也许会想出一个比这好得多的系统来做这类事情。

如果你每天都用缩放仪工作的话，你甚至每步都能够达到一个比 4 大得多的因子。但是你不可能直接通过一个缩放仪工作，然后这个缩放仪又产生一个小缩放仪，小缩放仪又产生一个更小的缩放仪——因为它的孔很松散，结构也不规则。缩放仪末端不规则摇晃的程度要比你手不规则晃动的程度相对大些，缩放仪的末端接着另一个缩放仪又接着另另一个缩放仪，这样接下去，你会发现，缩放仪的最末端会抖动得非常厉害，根本不能有效地工作。

在每一步上，我们都必须提高仪器的精确度。比如，举例来说，在用缩放仪做了一个小车床之后，我们发现它的导螺杆不规律——比大尺度的导螺杆更不规律。这时我们可以把导螺杆抵上易碎的螺帽——这样你就能够以常用的方法前

后进退，直到这导螺杆在它自身的尺度上达到我们原始的导螺杆在我们的尺度上的精度。

为了获得平坦的板面，我们可以把不平坦的板面一式三份——分三层——叠在一起摩擦，这些平面就会变得比起初更平坦。这样，通过正确的操作，我们就有可能在小尺度上提高精度。因此我们在制造这东西时，必须在每一步上改进设备的精度，我们的方法，是让它运转一会儿，在工作中达到那个精度——我们制造精确的导螺杆、约翰逊块规，然后我们在精确的机器上所使用的所有其他东西，都会在更高的水准上工作。我们得在每一个级别上制造所有的东西，然后再走向下一个级别——这是一个很长，也很困难的程序。也许你能想出一个比这更好的途径，更快地走向小尺度。

可是，在你做到了所有这些之后，你也才拥有了“一台”比通常的车床小 4000 倍的小婴孩车床。但是我们考虑的是造一个巨无霸计算机，我们需要在这台车床上钻孔，为这巨无霸计算机制造小垫圈。在这“一台”车床上，你能生产多少垫圈呢？

一百只小手

在四分之一尺度上造我的第一套奴“手”时，我打算造十套。我造十套这样的“手”，用导线把它们接到我最初的操纵杆上，于是它们并行工作，同时做完全相同的事。然后，当我再在新的四分之一尺度上造新的装置时，我让每个装置制作十个复制品，这样我就有了一百只 1/16 尺度的“手”。

我会有百万台车床，我把它们放哪儿呢？哦，没关系，

它们的总体积甚至比一台满尺度的车床还要小得多。比如说我造 10 亿台小车床，每台车床的尺度是常规车床的 1/4000；如果这样，我们就会有足够的原料和空间，因为 10 亿台小车床所含的材料，比一台大车床所含的材料还要少。你看，它不费什么材料。所以我可以建 10 亿座小工厂，互为模型，同时进行加工作业——钻孔，压件，等等。

随着尺寸缩得越来越小，出现了许多有趣的问题。所有东西都不会是简单的比例缩小，这里有个分子力的问题，即分子（范德瓦尔斯 *）间的相互吸引会让物质黏在一起。因此可能出现这样的场景：在拆卸一个部件时，你把螺帽从一个螺栓上拧下了，但螺帽掉不下来，因为这时候它已经感觉不到重力了，甚至你要把它从螺栓上弄下来都不容易。这就像老电影里的场景，一个手上黏满了糖蜜的人，想扔掉手里的水杯。我们会遇到好几个这类性质的问题，所以在设计方面得为此做好准备。

重新排列原子

但是我并不害怕面对这最后的一个问题：在伟大的将来，我们最终是否能够按照我们想要的方式排列原子？就是把“原子”一路排下去！如果我们可以按照我们所希望的样子把原子一个一个排列起来，结果会怎么样（当然有可能带来后果，比如它们的化学性质不能因为你对它的原子进行排列而变得不稳定）？

* 范德瓦尔斯力：原子或分子间微弱的吸引力。Johannes Diderik Van der Walls（1837~1923），他因为在气体或液体状态方程方面的工作，获得 1910 年诺贝尔物理学奖。——编者

迄今为止，我们一直满足于在地上挖掘探矿。我们对矿物进行加热，大规模地处理它们，希望得到更纯净的矿物。但是我们总是不得不接受自然界提供给我们的某种原子排列，我们还从未得到过一种东西，比如说，它的原子排列像“跳棋盘”，混合的原子严格以 1000 埃的间距分散排列，或者排列成其他什么图案。

我们能够利用只有右层的分层结构做些什么事？如果我们真的能够照我们所希望的样子排列原子，这些物质会有些什么样的性质？对此作一些理论探讨会很有意思。我无法准确地展望到会发生什么样的事情，但是我也很难去怀疑，如果我们能够在一个小尺度上对事物的安排有所控制，我们就可以使材料具有远为丰富的可能性质，我们就能够做远为丰富的不同事情。

比如，有这么一片材料，我们在它里面制造小线圈和电容（或它们的固态类似物），每个电路的尺度为 1000 或 10000 埃，一个紧挨一个，布满一大片面积，而其另一端则是伸出的天线——整个一连串的电路。那么，是不是可能，比如说，从一整套天线发射出光，就像我们从组织起来的一套天线发射电波，向欧洲播送广播节目一样？同样的事情可能是在一个确定的方向上，以很高的强度发送光。（也许从技术或经济的角度看，这样一束光并没有多大用处。）

我思考过搭建小尺度电路时的一些问题，其中阻抗的问题比较严重。如果你搭建一个小尺度对应电路，因为波长随着尺度而减小，所以它的自然频率会升高；但是透入深度只随尺度比（Scale ratio）的平方根而减小，因此抵抗的问题越来越困难。如果频率不是太高的话，我们也许可以通过使用超导或其他技巧来克服阻抗的问题。

小世界中的原子

如果我们来到一个非常非常小的世界——比如七个原子组成的电路——我们会遇到许多新鲜事物，为设计带来全新的机会。在小尺度上，原子的行为与在大尺度上完全不一样，因为它们此时遵循量子力学的定律。因此，当我们下到那儿，跟那儿的原子打交道时，我们是在和不同的定律进行合作，我们也因此有望做不同的事情。我们可以以不同的方式进行制作；我们可以使用的，不只是电路，而是某些涉及量子能级的系统，或者量子自旋的相互作用，等等。

我们要注意的另一件事是，如果我们往下走得足够远，我们就可以大批量生产所有的装置，这样它们就是一个个绝对完美的复制品了。我们不可能制造两台大机器而保证它们的尺寸严格一致。但是如果你的机器只有 100 个原子那么高，为了保证另一台机器与之尺寸严格一致——即 100 个原子的高度，你只需精确到 0.5%就行了。

在原子级别上，我们有新的力，新的可能，新的效果。在这里，材料的生产和复制问题会很不一样。就像我说过的，生物现象激励着我，在那里化学力被重复使用，产生各种不可思议的结果（其中之一是作者）。就我所知，物理原理并不反对一个原子一个原子地移动物体的可能。这不违背任何定律，从原理上讲是可以做到的；但是在实践中还没有做过，因为我们太大了。

最后，我们可以进行化学合成。化学家走上来对我们说，“嗳，我要一个分子，它的原子须如此这般排列。你们给我造个这样的分子。”当一个化学家想“造”一个分子时，

他是在做一件很神秘的事情（因为他看不到自己在做什么，也不能知道会有什么结果）。他看到分子中有个环，于是他把这个和那个混合起来，摇一摇，折腾一阵。经过一个困难的过程，他往往真的成功地合成了他想要的东西。但是如果我的装置运作起来，我们就能够用物理方法进行合成，到那时候，他可以计算出如何合成他所想要的任何东西，而从前化学家的合成方法就真的没有什么用了。

但是，一个物理学家原则上可以（我认为）合成化学家写下来的任何化学物质，这是很有意思的。化学家下订单，物理学家合成它。怎么合成？把原子放到化学家所指定的那个位置上，你就造成了那个物质。如果我们能够看到我们所做的事情，如果我们能够在原子级别上做事情，如果我们这两方面的能力最终发展起来——我想这发展是不可避免的——这对化学和生物问题将有很大的帮助。你也许要问，“谁会去做这事？他们为什么要做这事？”我前面已经点出了几个经济方面的应用，但是我知道，人们可能仅仅是出于娱乐或者因为好玩而去做这事。只是因为好玩！那就让我们实验室之间来个竞赛吧。让这个实验室做一个小发动机送给另一个实验室，这后一个实验室在发动机的连杆上装一个东西，又把它送回给前一个实验室。

中学竞赛

仅仅为了娱乐，为了让孩子们对这个领域产生兴趣，我建议哪位与中学有联系的人考虑一下，组织某种中学竞赛。毕竟在这个领域，我们甚至还没有起步，而孩子们甚至也能够写得比以前更小。我们可以在中学进行竞赛。洛杉矶中学

可以送一根针给威尼斯中学，在上面写道，“这怎么样？”（What's this?）威尼斯中学把针送回去，在“i”的点上写道，“不是很突出。”

也许竞赛还不能激励你去做这事，而只有经济才有激励作用。那么，我希望能为此做一点事情，但是目前我还做不到，因为我还没有预备好基金。如果谁能第一个把某本书上一页的内容以这种方式放置到线度为其 1/25000 的面积上，使它可以借助电子显微镜来阅读，我愿意提供给他 1000 美元奖金。

而且我还想提供另一份奖金——希望我能想出怎么来表述它，以免陷入关于定义的混乱争论——另一个 1000 美元，给第一个做成一台电机的人——一台能够从外部对它进行控制的旋转电机；不计进线，只有 1/4 立方英寸。

希望这奖金不要很久就能等来申领者。

最终，费曼不得不奖励两方面的挑战者。下面的内容来自《费曼与计算》的概述。此书由安东尼·J·G·黑编辑（珀尔修斯，雷丁，马萨诸塞州，1988），获权重印。

他在这两方面都发放了奖金——第一笔奖金，离他的演讲还不到一年，给了加利福尼亚理工学院的毕业生，比尔·麦克莱楞（Bill McLellan），他制造了一台满足要求的小型电动机。但是对费曼来说，这台电动机还带有几分遗憾，因为它不需要新的技术方面的进步。费曼因此对他在 1983 年为喷气推进实验室所作的演讲做了个及时的更正。他预言“用目前的技术，我们很容易就能够……制造出比麦克莱楞的电动机小 64000 倍的电动机，它每个维度的尺寸只有麦克莱楞

电动机的四十分之一，而且我们可以同时制造数千台这样的电动机。”

又过了不到 26 年，他不得不发放第二笔奖金。这一次给了斯坦福的研究生，汤姆·纽曼。费曼挑战的尺度是把整个二十四卷《大英百科全书》写到一根针的头上：纽曼算出，每个独立的字可以只有五十个原子的宽度。在其论文导师离城的日子里，利用电子束平版印刷，纽曼终于能够以 1/25000 的比例缩写了狄更斯《双城记》的第一页。人们常常赞誉是费曼的论文开启了纳米技术领域，现在我们有定期的“费曼纳米技术奖”竞赛。

6　科学的价值

在其所有的价值中，最大的价值无疑是怀疑的自由。

在夏威夷游览一座佛教寺院时，费曼得到了一个关于谦逊的教训："每个人都有天堂之门的钥匙；同样是这把钥匙，也开启地狱。"这是费曼最精妙的言辞之一，是他对科学与人类经验之间相互关联的沉思。他还就科学家对未来文明的责任问题，教诲他的同行们。

经常有人向我建议，说科学家应该多关心些社会问题——特别是在思考科学对社会的冲击时，他们应该多一点责任心。许多其他科学家一定也收到过同样的建议，人们似乎普遍相信，只要科学家们愿意去看看这些很困难的社会问题，而不是在不那么关键的科学问题上浪费那么多的时间，就能出伟大的成就。

在我看来，我们确实也时时思考着这些问题，但我们不把全部精力放在这方面——因为我们知道，我们没有什么神奇的方程可以用来解决这些问题，而且社会问题要比科学问题难得多，我们思考这些社会问题的时候，也常常是一头雾水。

我相信，在看一个非科学的问题时，科学家和其他人一样笨——在他谈论一个非科学的问题时，他说的话听起来一定很幼稚，和任何一个在这方面没有受过训练的人没有什么区别。既然科学的价值问题不是一个科学的话题，我现在就把这个讨论奉献出来，作为一个例子来证明我的观点。

科学表现其价值的第一种途径，是大家都熟悉的，即：有了科学知识，我们就能够做各种事情，制造各种东西。如果我们（用它）制造好的东西，当然（就能证明科学的价值），这不仅是科学的荣誉，也是引导我们向善的道德选择的荣誉。科学知识是一种能力，可以做好事，也可以做坏事，但它本身并不指导人如何使用这能力。这种能力显然有其价值——尽管这种能力也许会因为他所做的事而遭到否认。

在去檀香山的旅途中，我获悉了表述这种普遍的人类问题的一种方法。在那儿的一个佛教寺庙里，管理员给游人略略解释了一下佛教，然后告诉听众他有些话要对他们说，他

要他们永远不要忘记这句话——他以这句话结束了他的讲话，我确实也一直没有忘记这句话。这是佛教的一句格言：

“每个人都有天堂之门的钥匙；同样是这把钥匙，也开启地狱。”

那么，天堂钥匙的价值是什么？确实，如果我们缺乏明确的教导，不能确定哪一扇门是天堂之门，哪一扇门是地狱之门，那么使用这把钥匙也许是危险的。但是它又无疑是有价值的——没有它，我们怎么能够进入天堂？

如果没有这钥匙，教导也就没有价值。所以，尽管科学可能给世界带来无数的恐惧，但它有价值，因为它能够带来一些东西。这是显而易见的。

科学的另一个价值是娱乐，一种被称为智力享受的娱乐。有些人在阅读、学习和思考中得到这种享受，另一些人则在科学工作中得到这种享受。这在科学的价值中是十分真实、十分重要的一点，然而那些告诉我们说思考科学对社会的冲击是我们的社会责任的人对此却没有足够的认识。

这种单纯的个人享乐，是作为整体的社会的价值吗？不是！但是思考一下所谓“社会价值”本身，也是我们的一个责任。从根本上来说，所谓“社会价值”，是不是就是准备、安排事物以便人们享受这些事物呢？如果是的话，那么科学享乐就和任何其他事情同样重要了。

但是我希望不要低估世界观的价值，它是科学努力的成果。科学引领我们进入无限的遐想，想象各种各样的事情；这种科学的遐想，远比过去诗人们和梦想家的想象更为绚烂。我们知道，自然的想像力比人的想像力伟大得多。比如，一个旋转着的球，它已经在太空里轻盈地漂游了数亿年。这种情景的神奇魅力，深深地吸引着我们——我们有一

半的人为之神魂颠倒。对我们所有的人来说，这情景要比骑在大象背上，由一只乌龟驮着在深不见底的海洋中漫游奇妙得多！

这些事我已经暗自思考了许多许多回，所以我希望，如果我是在提醒你们某些我确信你们每个人都已经有的思想——或这一类的思想（过去没有人会有这些想法，因为那时的人不像我们今天这样拥有（这么多）关于这个世界的信息），请你们不要厌烦。

举例来说，我独自站在海滩上，陷入沉思。海边这些冲过来的浪……成山成堆的分子，傻乎乎地各怀心思……百万兆各自分离的分子……但是它们在齐奏中形成白色的浪花。

许多许多年……在任何一双眼睛能够看到它之前……一年又一年……轰鸣着扑向海岸，就像现在一样。为了谁？为了什么？……在一个没有任何生命可以愉悦的、死寂的行星上。

永不停息……受着能量的折磨……这太阳所耗损的……倾向太空的巨大能量，其中的一点点就使海洋咆哮。

大海的深处，所有分子重复着一个又一个图案，直到形成复杂的新的图案。它们让其他的也像它们一样……然后一个新的舞蹈开始。

规模方面和复杂性都在增长……生物，原子团，DNA，蛋白质……舞着一个更为复杂的图案。

离开了摇篮来到干燥的陆地……在这儿它站立起来……有知觉的原子……有好奇心的东西。

站在海边……惊奇于惊奇……我……一个原子的世界……世界中的一个原子。

伟大而美丽的冒险

考虑任何问题，只要有足够的深度，心中总会一次又一次升起同样的激动，同样的敬畏和神秘感。随着知识越来越多、越来越深入，那越来越美妙的神奇引诱着你向更深处继续突进。从不担心得不到答案，带着愉悦和自信，我们翻开每一块新的石头去发现不可想象的奇妙之事——那引领我们向更美妙的问题和秘密的奇妙之事——这无疑是一场伟大而美丽的冒险！

确实，很少非科学界的人有这种特殊形式的宗教经验。我们的诗人不写它，我们的艺术家也不描述这值得注意的事情。我不知道为什么这样。难道没有人被我们现在的宇宙图景感动？歌唱家还从未歌唱科学的价值，所以现在你只好降而求其次——不是听一首歌唱科学价值的歌或一首歌咏科学价值的诗，而是听一场在晚上举行的关于科学价值的演讲。现在还不是一个科学的时代。

之所以是现在这个样子，原因之一可能是你必须懂得如何“读”音乐。例如，一篇科学文章可能说这样的话：“老鼠大脑中的放射性磷在两周时间内降到了一半。”这什么意思呢？

它的意思是老鼠大脑中的磷（你、我脑中的也一样）和两个星期前不一样了，大脑中所有的原子都代谢了，也就是说，以前在大脑中的原子已经消失了。

那么，这心灵是怎么回事？这些有知觉的原子是怎么回事？上星期的马铃薯！这就是现在所能记得的、一年前我心中所想的东西——一个早就被替代了的心灵。

当某人发现了大脑中的原子被其他原子替代所需的时间时，也是这个意思。这说明我所谓的“我的个人性”这东西，仅仅是一个图案或一个舞蹈。原子进入我的大脑，跳了个舞，然后又出去了；总是有新的原子，但总是跳着相同的舞，总是记着昨天所跳的舞。

杰出的思想

我们在报纸上读到它时，是这样说的：“科学家说这个发现可能在癌症治疗方面有重要意义。”报纸所感兴趣的仅仅是这个思想的应用，而不是这思想本身。除了有些孩子也许抓住了它，很少人能够理解一个思想的重要性，因为它是如此杰出。当一个孩子被像这样的一个思想迷住了的时候，一个科学家就诞生了。这些思想确实向下渗透（尽管关于电视代替了思考有那么多的争论），许多小孩子接受了这个精神——一旦他们有了这种精神，我们就有了个科学家。若等他们进了大学再接受这精神就太晚了，所以我们一定要试着向孩子们解释这些思想。

我现在要转而去讲科学所具有的第三种价值。这第三种价值更间接些，但还不是特别间接。科学家有许多无知、怀疑、不确定的经验，我想，这种经验非常、非常重要。当一个科学家不知道一个问题的答案时，他是无知的。当他对结果是什么有了个想法的时候，他不能确定。然后，当他满怀激情确信结果将会怎么样时，他有些怀疑。我们已经知道，为了能够进步，我们必须承认自己的无知，为怀疑留下空间。这是最最重要的。科学知识是个表述的集合，其中的表述有着不同程度的确定性——有一些最不确信，有一些接近

确信，但没有绝对的确定。

我们科学家对此已经习惯了，在我们看来，始终如一地保持不确信的态度是理所当然——也就是说，生活在不知道之中，这当然是可能的。我们这种怀疑的自由，是在科学的童年时代与权威的斗争中诞生的。那是很深入、很激烈的斗争。允许我们去询问——去怀疑，就这样——不要确信。我认为，我们千万不要忘记这斗争的重要性，否则我们就可能失去我们已经得到的东西。这也是对社会的一个责任。

想到人类似乎有令人惊奇的潜力，再对比他们小小的成就，我们都感到很悲哀。一次又一次，人们认为我们能做得比这好得多。先人们在他们那个时代的黑暗中看到了一个未来的梦；作为他们的未来，我们看到，他们的梦想有许多已经被超越过去了，也有许多仍然是梦想。我们今天对未来的期望，很大一部分还是他们昨天的期望。

教育，为了好和坏

曾经有人认为，人们的潜在价值没有能够发展出来，是因为他们中的大多数都愚昧无知。通过普遍的教育，所有人都能成为伏尔泰吗？教坏东西的效率至少不比教好东西的效率差。教育是种很强的力量，但是可以为善，也可以为恶。

以为国家间的交流一定能增进理解，这是又一个梦。但是我们既可以疏通通讯的机器，也可以阻塞通讯的机器。传送的信息可能是真理，也可以是谎言。通讯也是种很强的力量，但是可以为善，也可以为恶。

至少应用科学应该把人从物质问题中解脱出来，比如医学控制疾病。我们这儿的记录似乎都是为善的。然而也有人

为了制造瘟疫和毒药而耐心工作。这些东西会被用于噩梦一般的明天。

几乎所有的人都不喜欢战争。我们今天的梦想是和平。在和平里，人所具有的无穷潜力可以得到最好的发展。但是未来的人们也许会发现，和平同样既可能是好的，也可能是坏的。平和的人可能出于厌倦而喝酒。那么喝酒就可能成为个大问题，似乎会阻碍人们利用其能力获得所有他认为应该的东西。

显然，和平是一个伟大的力量，还有诸如清醒，诸如物质力量、通讯、教育、诚实以及众多梦想者的理想，都是一种很强的力量。

我们今天所掌握的这些力量比古人要多得多，与他们当中的大多数人相比，我们也许做得好一点。但是，和我们所取得的乱七八糟的成就相比，我们应当能够做到的简直可以说是恢弘无比。

为什么这样？为什么我们不能战胜自己？

因为再伟大的力量和能力，它们本身也并不附带着清晰的使用手册，教你如何使用它们。举个例子来说，对物理世界如何运动的了解，我们已经有了丰富的积累，然而这丰富的理解的结果，不过是使我们确信物理界的行为好像是漫无目的的。科学并不直接教导好和坏。

有史以来，人们一直想弄清楚生命的意义。人们已经意识到，如果我们的行为有方向或意义，人的伟大力量就能发挥出来了。所以，关于生命的意义这个问题，人们肯定已经给出了许多许多答案。但是他们的答案各不相同。鼓吹这个答案的人们，用惊恐的眼神，看着相信那个答案的人们的行为。惊恐！因为从一个持不同意见者的角度来看，人类所有

的伟大潜能正被导向一个错误的方向，一个狭窄的死胡同。历史上，错误的信仰产生过无数的怪物，正是从这里，哲学家们认识到了人类显然具有无限的、令人惊奇的能力。我们的梦想，是为人类这无限的、令人惊奇的能力找到一个开放的通途 *。

那么，生命的意义是什么呢？为解开存在之谜，我们能说些什么？

如果我们把所有的事情都考虑进去——不仅仅是古人所知道的事情，还有古人不知道而我们今天知道的事情——我想我们必须坦承：我们不知道。

但是，在接受这个事实的时候，我们也许已经发现了通途。

承认自己的无知，这不是一个新的思想，这是理性时代（一直就有）的思想。这是指导人们制定民主政治的哲学，我们现在就生活在他们所制定的民主政治之下。没有人真正知道该如何运作一个政府，这一思想导致了另一个思想的产生，即我们应该筹划一个系统，一个可以反复试验而达到最佳状态的系统。新的思想可以通过这个系统而得到发展，验证，抛开，然后更多的新思想又被带进来。这个方法是 18 世纪末科学的成功所带来的结果，那个时候科学已经表现为一个成功的开拓。甚至在那时，关心社会的人们就已经清楚地认识到，可能性的敞开是个机会，怀疑和讨论对于我们进入未知领域至关重要。如果我们希望解决我们以前从未能够解决的问题，我们一定要把门留给那些未知的疙瘩。

* 这是相对于前面的死胡同而言的，原文为 open channel。——译者

我们作为科学家的责任

我们还只是处在人类的起始阶段。我们和问题搏斗不是没有理由的。人类还有成千上万年的未来，我们的责任是做我们所能做的，学我们所能学的，促进问题的解决并越过它们。我们有责任留给未来的人们一只自由的手。在人类鲁莽的青年时期，我们可能犯严重的错误，而这严重的错误会长期阻碍我们的成长。如果我们说我们现在已经有了答案，我们就真的会犯那样的大错，如此年轻，如此无知。如果我们压制所有的辩论，压制所有的批评，说，“这就是答案，孩子们，人类得救了！”那么人类就注定要在很长一段时间内被权威拴住，被我们现在有限的想像力束缚住。这样的事以前已经发生过许多次了。

作为科学家，我们了解，有一种令人满意的无知哲学是多么重要，它是人类的一个重大进步；我们了解，这个重大进步是思想自由所结出的果实。我们有责任宣示这自由的价值；我们有责任教育人们为什么不必害怕怀疑，而应该欢迎它、议论它。我们有责任去追求这自由，我们应该把这种追求当作我们对所有下一代应负的责任。

7　理查德·费曼

挑战者号航天飞机调查的小型报告

1986 年 1 月 28 日，挑战者号航天飞机在升空后不久爆炸，六名职业宇航员和一名中学教师不幸遇难。这个国家受到了沉重的打击，NASA（美国宇航局）数年来成功的——或者说至少没有致命失败的——空间发射所带来的自满被打破了。事后成立了一个委员会调查事故的原因，并就防止这样的灾难再次发生提出建议。委员会由国务卿威廉·P·罗杰斯领导，组成人员有政治家、宇航员、军方和一位科学家。理查德费曼就是调查委员会中那位唯一的科学家，这一事实本身也许已经表明他们将解答挑战者号失败的原因，而不是想让它成为永远的秘密。费曼比大多数人更勇敢，他不辞辛劳，在全国各地飞来飞去，与当事人员交谈，这些工程师已经认识到，在太空计划中宣传压倒了审慎和安全。费曼的报告差点被调查委员会压制，因为委员会认为这会令 NASA 难堪。但是费曼坚决抗争，要把他的报告收进去；最后它被归入了一个附录。在调查委员会为回答问题而举行的一个现场直播的记者招待会上，费曼用一个航天飞机上的垫圈（或 O-形圈）和一杯冰水做了他那个著名的现场实验，戏剧性地证实了是那些关键的垫

圈出了问题，其原因正如工程师们所警告的那样，管理者为了给老板留下飞行计划按时进行的印象而忽略了外部太冷不宜发射的安全隐患。下面就是那个历史性的报告。

绪　论

对于机毁人亡这样一种失败的几率，人们的观点看来有相当大的差距，评估值范围大约从 1 比 100 到 1 比 10000。较高的数值来自于实际工作的工程师，非常低的数值则来自于管理人员。导致这种不一致的原因何在？这种不一致会带来什么后果？1 比 100000 的几率，意味着你可以每天升空一架航天飞机，连续 300 年而只损失一架。既然如此，我们就更有理由追问："是什么原因使得管理人员对这机器有这样灾难性的信任？"

我们还发现，《飞行准备评论》中所使用的合格标准往往逐渐降低，越来越不严格。"同样的风险，以前都飞过去了，没有失败。"这种论调往往成为再次接受风险的借口，以为那样做是安全的。因此，显而易见的缺点一次又一次地被接受，有时甚至根本就没有充分认真地考虑去修补这些缺点，或者因为这些缺点仍然存在而推迟发射。

我们有各种资料来源。我们有出版的发射合格标准，里面记录着以放弃和偏离的方式更改标准的历史。另外，每次飞行文件的《飞行准备评论》记录中，也保存着惯于接受飞行冒险的论点。还有的资料来自于直接的证词以及安全范围官员路易斯・J・尤里恩（Louis J. Ullian）关于固体燃料火箭成功史的报告。他（作为发射中止安全委员会主席）还就在未来星际发射中飞行一个钚动力装置（RTG*）时，一个可能事故导致放射污染的问题做了深入研究，试图评估其中的风

* Radioisotope Thermo-electric Generator 放射性同位素热电式发电机。——译者

险。NASA对同样问题的研究也是可以利用的。为了了解航天飞机主发动机的历史，我们访问了马绍尔群岛的管理人员和工程师，并与火箭动力 * 的工程师进行了非正式的会见。我们还与曾为NASA提供发动机咨询的自由力学工程师（来自加利福尼亚理工学院）进行了非正式会面。访问了约翰逊，收集关于航空电子设备（计算机、传感器、受感器）可靠性的资料。最后，还有 1986 年 2 月由摩尔（N. Moore）等人写于喷气推进实验室的报告，《对于可用于载人可重复使用火箭发动机认证程序的检讨》。报告是为NASA总部、空间飞行办公室准备的，涉及联邦航空局和军方认证他们的气轮机和火箭发动机的方法。我们也非正式地访问了这份报告的作者。

固态燃料火箭（SRB）

通过对此前所有火箭飞行经验的研究，安全范围官员对固体燃料火箭的可靠性有个评估。总共近 2900 次飞行，失败了 121 次（每 25 次失败 1 次）。但是这里面包括所谓的早期错误，即火箭的最初几次飞行，在最初的几次飞行中发现并修正了设计错误。对于成熟的火箭来说，更合理的数字应该是每 50 次失败 1 次。如果在检查和部件的选择方面予以特别的审慎，应该是可以达到低于 1:100 的失败率；但是以今天的技术，可能无法达到 1:1000（既然航天飞机上有两台火箭，而航天飞机失败的几率是取决于固体火箭助推器的失败，所以这些火箭失败的几率应该翻倍。）

* Rocketdyne，研究火箭动力的一个机构。——译者

NASA 官员争辩说数字要低得多。他们指出，这些数字是针对无人火箭而言的，但是既然航天飞机是载人的飞行器，所以“发射成功的可能性必然非常接近 1.0。”这个说法所表达的意思不太清楚。是接近于 1，还是“应该”接近于 1？他们继续解释：“从历史的观点来说，这种特别高的发射成功率，已经使载人航天计划和无人计划之间发生了一个哲学的区别；换句话说，是数字概率的使用对决工程学的判断。”（这段话引自《航天飞机资料：星际发射 RTG 安全分析的航天飞机数据》，3-1，3-2 页，2 月 15 日，1985，NASA，JSC。）确实，如果失败的概率低到 1:10000，就需要那么、那么多次数的实验来证明它（否则的话，除了一连串完美的飞行，你不可能得到什么，除非概率可能少于迄今为止那一连串飞行的次数）。但是如果实际的概率没有这么小，飞行就会遇到发生故障、濒临失败以及合理的估计下可能有的实际失败。事实上，以前 NASA 的经验已经表明，有时就是这些困难、濒临事故、事故——所有这些都在警告，飞行失败的概率其实并不是那么小。不要通过历史的经验去测定可靠性，就像安全范围官员所做的那样，这个争论的矛盾是，NASA 也诉诸历史，开始“从历史的观点来说，这种特别高的发射成功度……”最后，如果我们要以工程学的判断来替代标准的数据概率的使用，那么为什么管理官员的评估和工程师的判断之间有如此巨大的差异？看来，不管是出于什么目的，也许是为内在的目的，也许是为外在的目的，NASA 的官员确实是夸大了其产品的可靠性，夸张到了幻想的程度。

这里不再复述许可证的历史和《飞行准备评论》的历史。（见委员会报告的其他部分。）在以前的飞行中，飞机密

封圈已经显示出腐蚀和窜漏 *的迹象。因为密封圈而付出代价的现象是很明显的，挑战者号飞机是个极好的例子。人们多次提到此前所执行的飞行；这些飞行的成功，被当成了安全的证据。但是腐蚀和窜漏的现象出乎设计的意料之外，它们在警告我们：一定是某个地方出问题了。设备不能如所希望的那样运行，因此这儿就有一个危险：它会以这种意外而且我们完全不了解的方式，带着甚至更大的偏差运行。这个危险以前没有导致大灾难并不能保证它下一次不会导致大灾难，除非我们完全了解它。这就像在玩俄罗斯赌命 **一样，第一击的平安丝毫不能给下一击带来安慰。人们不了解腐蚀和窜漏的起因和后果；所有的飞行和所有的对接上发生腐蚀和窜漏的情况也不相同，有时多一些，有时少一些。为什么有一次，即使所有决定腐蚀和窜漏的条件都具备了，甚至更多，却没有导致大灾难？

尽管一次一次的情形各不相同，但是看官员们的行为，却好像他们理解这现象似的，他们常常以以前的成功飞行为依据，相互给出明显的逻辑论证。比如，在决定 51-L 航班是否能安全飞行时——尽管面对着 51-C 的环腐蚀现实——他们提出，腐蚀的深度只有半径的三分之一。因为在一次切割环的实验中，已经证明切割的深度必须达到一个半径时，环才会坏。他们不去认真考虑，我们知之甚少的条件的变化，有可能使这一次的腐蚀更深一些；而是声称有“一个安全因子”。“安全因子”原本是工程师的术语，在这里的用法却很奇怪。如果我们修一座桥，要求它受得住一定的载

---

* 指汽缸和活塞之间运动时液体的渗漏。——译者

** Russian Roulette，一种惊险的技艺表演。一把左轮手枪里装有一颗子弹，表演者持枪对自己脑袋开枪，但不知道子弹在哪个枪膛里。——译者

重而梁不会永久变形、纹裂或折断，那么设计材料惯常的实际承受力应该是设计载重的三倍。这个“安全因子”是为了顾及不确定的超载，或未知的额外负载，或者材料的弱点，因为材料可能有我们意料不到的缺陷，等等。如果现在预期的载荷加到了这座新桥上，而桥的一根梁出现了一个裂缝，这就是设计上的一个失败。即使因为裂缝只有梁长的三分之一因而桥实际上没有塌陷，但是这也根本谈不上什么安全因子。固体火箭助推器的 O-环的腐蚀并不在设计预期之内。腐蚀是一个线索，暗示某个地方出了问题。我们不能由腐蚀推断出安全。

没有充分的理解，你不可能有这样的自信，相信下一次的情况不会产生严重程度三倍于以往的腐蚀。然而，官员们却不顾情况的变化各各不同，自欺欺人，认为自己有这样的理解和自信。他们设计了一个数学模型来计算腐蚀的情况，然而这不是一个以物理的理解为基础的数学模型，而是一个以经验曲线的吻合为基础的数学模型。说得更具体一些，他们设想有一股热气体流冲击到 O-环材料上，其热量是在停滞点上测定的（到此为止，还是符合合理的物理规律，热力学规律的）。但是他们假定，要测定多少橡皮被腐蚀掉，仅仅取决于这热量，而计算这热量的公式，来源于相似材料上得来的数据。一个对数坐标给出了一条直线，因此他们设想腐蚀量与 0.58 热力成正比，0.58 是由最近的一个符合点确定的。总之，修正一些其他数字，他们确认那模型和腐蚀的情况是相吻合的（腐蚀深度是环半径的三分之一）。相信这个答案，这没有什么大错！然而不确定性比比皆是。气流的强度无法预测，它取决于油灰里面形成的孔。窜漏现象表明，即使没有腐蚀或只是部分腐蚀，环也会坏。我们知道，

经验公式是靠不住的，因为它不直接穿过决定它的那些数据点。有一批点不在所画出的曲线上，而在曲线的两倍之上或两倍之下，仅仅从这个因素出发，就有理由把预测的腐蚀情况加倍。

液体燃料发动机（SSME）

在 51-L 的飞行过程中，三个航天飞机主发动机的工作都很完美，甚至在最后的时刻，当燃料供应开始衰退时开始关闭发动机。然而问题也出现了：它是否已经失败了？如果我们像对待固体火箭助推器那样深入到细节中去调查它，我们会发现一个相似的问题——对错误和恶化了的可靠性缺乏重视。换句话说，对事故负有责任的管理漏洞只是固体火箭助推器部门的事呢，抑或是 NASA 的普遍特点？最后，航天飞机的主发动机和电子设备都调查了，但是却没有对轨道飞行器和外挂舱进行过类似的研究。

发动机是比固体火箭助推器复杂得多的结构，牵涉到大量更具体的工程学。总的来说，工程的质量是高的，在运行中发现的不足与缺陷也显然得到了相当的重视。

这种发动机通常所采用的设计方法（为军队或民用飞机）可以称为构成系统，或者自下而上设计。首先，必须对所用材料（比如涡轮叶片）的性质及其局限性有透彻的了解，而且测试要从试验装置开始，测定材料的性质及其局限性。有了这些知识之后，再设计大一些的部件（比如轴承），而且要一个一个测试。一旦发现有不足和设计错误，就要通过进一步的试验进行校正和修改。既然你每次只是测试部件，所以这些测试或修正并不是太昂贵的。最后，你终于面

临完整发动机的最终设计，面临必要的详细说明。到这时候，发动机全面成功的机会就很大了，或者说任何故障都可以很容易找到并得到分析了，因为故障的模式、材料的局限性等等都摸得很清楚了。修正发动机以解决最后的困难，这时也不是很难的事了，因为在前面的步骤中，最严重的问题已经被发现并以较小的代价得到处理了。

但是，航天飞机主发动机所采用的却是另一种方法，我们应该说它是自上而下的方法。它的发动机是一下子设计和安装起来的，相对来说对材料和部件的细致的初期研究几乎没有。所以当发现轴承、涡轮叶片、冷却管等等有问题的时候，找到其原因并更换的代价就昂贵得多，也困难得多。比如，人们已经发现高压氧涡轮泵的涡轮叶片有裂痕。引起裂纹的原因是什么呢？材料缺陷？氧气对材料性质的影响？启动或关闭的热应力？稳定转动时的震动和应力？抑或主要是因为某种速度时发生的某些共振？如此等等。从裂纹出现到它导致失败，机器还能转多长时间？这多大程度上依赖于功率水平？如果用完成了的发动机作为试验床来解决这些问题，代价就太高了。人们不想为了找出故障出在哪儿以及故障如何发生而失去整个发动机。但是，为了对发动机在使用过程中的可靠性有个信心，对这些信息的精确了解是很关键的。没有细致、具体的了解，就不可能获得信心。

自上而下的方法还有一个更深的不利因素，即，如果我们弄清楚了一个缺陷，那么除非重新设计整个发动机，否则也许连一个简单的修改，比如安装一个新形状的涡轮罩都不可能。

航天飞机主发动机是个非同寻常的机器，它有很大的推重比，比以前所有发动机的推重比都大得多。它的建设，处

于以往工程经验的边缘，或者说是处于以往的工程经验之外。因此，如人们所意料的那样，出现了各种各样的缺陷和困难。不幸的是，因为它是以自上而下的方式研制的，这些缺陷很难发现，也很难修改。设计寿命为 55 次飞行（工作 27000 秒，一次发射或试验为 500 秒）的目标也没有能达到。现在，这发动机需要非常频繁地维护，非常频繁地更换重要部件，如涡轮泵，轴承，薄片金属罩等等。高压燃料涡轮泵每三或四次飞行就不得不更换（尽管这个问题现在也许已经解决了），高压氧涡轮泵每五或六次就要更换——这至多是原始规格的 10%。但是我们这儿关注的重点是对可靠性的决心。

在总共 250000 秒的运行中，发动机已经严重失败了大概 16 次。工程学紧密关注着这些失败，试图尽快修补它们。工程学是如何做的呢？通过在特殊设备上的试验，这设备是为所讨论的裂纹而实验性设计的；通过对发动机的仔细检查，因为这里有提示性的线索（比如裂纹）；通过相当多的研究和分析。这样，尽管有自上而下设计所带来的困难，经过艰辛的工作，许多问题显然已经得到了解决。

下面是一些问题的清单。那些带星号（*）的大概是解决了的问题：

高压燃料涡轮泵（HPFTP）里涡轮叶片裂缝。（也许已经解决）

高压氧气涡轮泵（HPOTP）里涡轮叶片裂缝。

强力火花点火器（ASI）破裂。*

净化止回阀故障。*

ASI 室腐蚀。

HPFTP 涡轮的金属薄板开裂。

HPFTP 冷却剂衬垫故障。*

主燃烧室 L 形输出管故障。*

主燃烧室 L 形输入管焊点偏移。*

HPOTP 亚同步旋转。*

飞行加速安全中止系统（在一个多余系统里部分失败）。*

轴承裂碎（已部分解决）。

4000 赫兹时的振动使得一些发动机不能运作，等等。

那些已经解决了的问题当中，有许多是新设计型在其前期所遇到的困难，因为其中的 13 个问题发生在第一个 125000 秒，只有 3 个问题发生在第二个 125000 秒。自然，你永远无法确信所有的隐患都被找出来了，而且有些修理也许还没有抓住真正的原因。因此，在下一个 25000 秒也许至少会有一个意外，即每个发动机每次发射出现一次意外的几率是 1/500 这个猜测并非是毫无道理的。一次发射中，共有三台发动机，但是里面也许含有一些意外事故，而且只涉及其中的一台发动机。如果只有两台发动机，系统就会失败。因此我们可以说，即使是这未知的意外也不允许我们估计因航天飞机主发动机故障而造成发射失败的几率低于 1/500。在这上面，我们还必须加上已知但是还没有解决的问题（上面所列中没有带星号的）所带来的失败可能。这些事情留待下面讨论。（火箭动力的工程师，制造者，他们估计失败的总几率为 1/10000；Marshall 的工程师估计它为 1/300；而同时，这些工程师的汇报对象，NASA，却声称几率为 1/100000；NASA 的顾问，一位独立工程师，则认为合理的估计应该是 1 或 2 个百分点。）

这些发动机合格标准的变化历史让人迷惑，而且很难解释。一开始的标准好像是这样的：两台样机必须每个都有两倍时间的成功运行，发动机的运行时间要有证书证明（2x 标准）。至少那是联邦航空局的惯例，NASA 似乎是采纳了的。最初所希望的时间，得到证明的时间，是 10 次发射（因此每台样机 20 次发射）。显然，用来作比较的发动机应该是那些总工作时（飞行+试验）最长的发动机——所谓的“舰队领袖”。但是，假如第三个样机和其他几个在短时间内失败了，那又怎么样呢？当然不安全，因为两个都是在持续时间长这方面不同寻常。短时间也许更能代表真正的可能，所以尽管有 2 安全因子，我们只该在短命的样机的一半时间工作。

在许多例子中，我们可以看到标准在向着降低安全因子的方向慢慢移动。我们拿 HPFTP 涡轮叶片来做例子。首先，试验整个发动机的想法被抛弃了。每个发动机还有许多重要部件（像涡轮泵自身）已经在频繁的间隙中替换过了，所以安全规则必须从发动机转移到组件。如果两个样机都已经成功地运转了两倍的时间（当然，作为一个实例，不再坚持这时间像 10 次发射一样大），则我们接受一个 HPFTP 作为一个许可时间。但是什么叫“成功地”？为了真正保证一个大于 2 的安全因子，在规定上或实践中，联邦航空局把一个涡轮叶片的裂缝也看作是失败。也有些时候，一台发动机能够在一个裂缝刚开始出现直到它增大到足以断裂期间一直运转（联邦航空局在关注着把这额外安全时也考虑在内的新规则，但是要求它必须在已知的经验范围内经过了对已知模型的很仔细的分析，而且材料也须经过彻底的试验。这些条件一个也不适用于航天飞机主发动机。）

许多二阶 HPFTP 涡轮叶片上出现了裂缝。有一次在1900 秒后发现了三条裂缝，而另外一次在 4200 秒后仍然没有发现一个裂缝，虽说这种长时间的运转通常都出现裂缝。为了能够沿着这故事追索下去，我们就得认识到应力很大程度上决定于功率水平这一事实。挑战者号飞机在发动机运转的大部分时间里，功率水平将维持在额定功率的 104%，过去的飞行就是这样的。从一些材料的数据来看，功率水平在额定功率的 104%时，裂缝时间大概是 109%额定功率或满功率时（FPL）的两倍。将来的飞行也将维持在这个水平上，因为巨大的有效载荷和许多试验都是在这个水平上做的。因此，把处于 104%状态的时间除以 2，就得到一个单位，叫做等值满功率水平（EFPL）。显然，这也揭示了某种不确定性，但是这种不确定性还没有得到研究。）前面提到的最早的裂缝发生在 1375EFPL。

现在，合格标准变成了“所有二阶叶片限制在一个最大值，1375 秒 EPFL。”如果某人反对，说安全因子 2 没有了，那么（没关系），人们已经指出，一个涡轮机运转了 38000 秒 EPFL 而没有裂缝，其一半是 19000。所以我们实际上是更保守了。我们已经在三个方面愚弄了自己。首先，我们只有一个样机，而且不是“舰队领袖”，因为其他两台 38000 秒或更多秒的样机有 17 片有裂缝的叶片。（发动机有 59 片叶片。）其次，我们已经抛弃了 2x 标准并替换了等量时间。最后，在 1375 处我们确实发现了一个裂缝。我们可以说在1375 之下没有发现过裂缝，但是我们最后一次检查而没有看到裂缝是在 1100 秒 EFPL。我们不知道裂缝形成于这期间的什么时候，比如，裂缝可能是在 1150 秒 EFPL 形成的。（在 1375 秒 EFPL 超额试验中，近乎 2/3 的叶片装置有裂

缝。最近的一些实验已经表明，裂缝早在 1150 秒就出现了。）保持比较高的数值是很重要的，因为挑战者的发动机在飞行结束之时将非常接近极限。

最后，人们宣称，放弃联邦航空局认为不能有裂缝的惯例而认为只有彻底断裂的叶片才是失败，这并不意味着抛弃了标准。如果照这个定义，就从来没有什么发动机失败。既然从开始出现一条裂缝到这裂缝发展到断裂之间我们有足够的时间，所以通过检查所有叶片寻找裂缝，我们就能保证一切都是安全的。如果发现了裂缝，就替换它们；如果没有发现裂缝，我们就有足够的时间进行一次安全的发射。这就使得裂缝问题不再是一个安全问题，而纯粹是一个维护问题了。

也许真的是这样。但是在多大程度上我们知道裂缝总是很缓慢地发展因而不至于在一次任务中发生断裂？三个发动机带着几片有裂缝的叶片已经运行了很长时间（大概 3000 秒 EFPL，没有叶片折断。

但是我们可能发现这开裂已经修理过。通过改变叶片形状，锤打叶片表面，覆盖上绝缘体以排除热震动，叶片没有裂得那么厉害。

在 HPOTP 的合格证历史上，也有过十分类似的事情，这里我们就不去说它的细节了。

总之，很明显，针对航天飞机主发动机的一些问题，飞行准备评论和合格标准都出现了退步，这和我们在固体火箭助推器的标准中所看到的退步非常类似。

航空电子设备

“航空电子设备” 指轨道仓上的计算机系统，也指它的输入传感器和输出执行器。首先，我们将把目光限制在计算机是否合适的问题上，而不考虑从温度、压力等传感器来的输入信息是否可靠，或者火箭点火、机械控制以及向宇航员的显示等执行器是否忠实地遵循计算机的输出。

计算系统非常精致，有超过 250000 列的代码。当你按下某个按钮以决定希望的登陆地点时，在许多其他部件中，计算系统就要负责自动控制上升到轨道的整个过程，并要负责下降过程，直到成功进入大气层（速度低于 1 马赫）。自动完成整个着陆过程是可能的（除非着陆下降轮信号明显脱离了计算机的控制，表面上出于安全的理由，必须由飞行员来操纵），但是这样一个完全的自动着陆也许没有飞行员控制下的着陆更安全。在轨道飞行期间，计算系统被用于控制有效载荷，向宇航员显示信息，以及与地面交换信息。显然，飞行安全要求这个计算机的硬件系统和软件系统的精确性能够得到保证。

扼要地说，它有四个实质上独立的同一计算机系统，用来确保硬件的可靠性。在那儿，可能每个传感器都还有若干个副本——通常是四个——每个副本向所有四个计算机系统提供信息。如果从传感器来的输入不一致，根据情况，某个平均值，或一个较高值就被用作有效输入。这四台计算机所用的运算法则完全相同，所以它们的输入（既然每台都查看所有传感器副本）也相同。因此在任何一步上，各台计算机的结果都应该是一致的。它们要时时进行比较，但是因为它

们运行的速度可能有轻微的差异，所以它们要在特定时期启动一个停顿和等待系统，直到每个比较都完成为止。如果其中一台计算机的结果与其他的不一致，或者它的答案准备得太迟了，那么其他两台结果一致的计算机就将被当作是正确的，而那台错误的计算机则被完全排除出系统。如果另一台计算机也失效了——这是由其他两台计算机一致判定的——它也要被排除出系统，于是未完成的飞行被取消，由剩下的两台计算机控制，开始向着陆位置降落。可以看出，既然只有一台计算机失败时，对任务的进行没有影响，所以这其实是个过剩系统。最后，还有第五台独立的计算机作为安全的一个额外特色，它的内存只装着上升和降落程序；在四台主计算机中有超过两台发生故障时，这第五台独立计算机能够控制降落。

因为主计算机的内存没有足够的空间储存飞行中所有上升、降落和有效载荷的程序，所以程序要由宇航员通过软盘安装 4 次。

对这样一个精致的系统来说，更换软件需要付出巨大的努力，更换一个新系统也需要巨大的代价，所以自从 15 年前这个系统开始运作直到现在，它的硬件没有任何改进。它所使用的硬件很陈旧，比如它的内存，就是老式的铁氧体磁心。现在已经越来越难找到能够可靠地、高质量地提供这种老式计算机的生产商了。现代的计算机要可靠得多，运转也快得多，它有简化了的电路，它可以做更多的事情，而且不需要那么多次安装程序，因为它们的内存大得多了。

软件的检查非常仔细，检查的方法也很彻底。先是检查每一列新代码，然后检查有特殊功能的代码区或模块。检查的范围一步步增加，直到新的变化结合成一个完整系统并得

到检查。根据最新的发布，这个完整系统被当作最终产品。但是，还有一个完全独立的独立检查组，他们所持的态度与软件发展组所持的态度相反。他们试验软件、检验软件，好像是交货产品的消费者。他们使用新软件时，在模拟器上还有一个附加检验，等等。在认证试验中发现一个错误将被看作一个非常严重的事件，他们会非常仔细地研究错误的来源，以避免将来再次出现同样的错误。在迄今为止所有的设计和所有完成了的程序转换中(换新程序或变更有效载荷)，这种意外的错误总共只发生过 6 次。他们遵循的原则是，所有的检验并不是程序安全的一个方面，而纯粹是无灾难认证过程中的一个安全试验。飞行是否安全，完全由认证试验中程序运行得怎么样来判断，这里的任何失败总是会引起相当大的关注。

概要言之，计算机软件检查系统和检查态度是无可挑剔的。没有出现像固体火箭助推器或航天飞机主发动机中那样一边降低标准一边逐渐愚弄自己的过程。确实，近来已经有管理层建议减少如此精密、如此昂贵的试验。他们认为在航天飞机后期历史阶段这是没有必要的。我们必须阻止这些想法，因为它没有意识到微妙的相互影响，即使程序某一部分一个细微变化所产生的错误也会影响到其他部分。因为使用者提出新的有效载荷、新的需求和修正，所以永远会有对系统进行变革的呼声。变革的代价很昂贵，因为它们需要广泛的试验。一个适当的省钱途径是减少所要变革的数目，而不是降低为每次变革而进行的试验的质量。

你也许要补充说，这精密的系统可以用更现代的硬件和设计技术加以大大改进。任何外部竞争都可以利用重新开始的优势超过我们，NASA 现在也该认真考虑考虑了。

最后，让我们回到电子系统的传感器和执行器上来。我们发现，在这里人们对待系统故障和系统可靠性的态度不像对待计算机系统那么好。举例来说，我们发现了一个困难，这是因为一些温度传感器不时发生故障而造成的。然而 18 个月过去了，我们还在使用同样的传感器，还是不时发生故障，直到有一次发射，因为两个温度传感器同时发生故障而不得不取消发射。甚至在一次成功的飞行中，还再次使用了这个不可靠的传感器。同样，反应控制系统，即飞行中用于重新定向和控制的火箭喷嘴，也有些不可靠。因为有可观的冗余，所以除了故障史较长，还没有一次故障扩展到足以严重影响一次飞行。喷嘴的活动由传感器来检查，如果它们没能点火，计算机就选择另一个喷嘴来点火。但是它们不是专为失败而设计的，这个问题应该解决。

结　　论

如果要坚持一个合理的发射计划，工程技术的进展就常常不可能进行得那么快以跟上最初许可标准的预期——那个许可标准是为保证一个非常安全的交通工具而设计的，非常保守。在这些情况中，很微妙，而且常常是借助明显的逻辑论证，标准被改变了，以便飞行仍然可能及时得到认证。他们因此也就要在一个相对不那么安全的条件下飞行，失败的几率大约在一个百分点左右（很难更精确了）。

另一方面，官方的管理人员却声称他们相信失败的几率要小 1000 倍。他们这么做的一个理由可能是想向政府保证其完美和成功，以确保政府的资金支持。另一个原因可能是他们真诚相信那是真的。这证明他们自己和他们的工程师之

间缺乏沟通，几乎到了令人难以置信的程度。

无论如何，这已经产生了非常不幸的后果，其中最为严重的是他们鼓励普通民众乘坐这样一个危险的飞行器，似乎它已经具有了普通飞机的安全性。像试飞员一样，宇航员应该知道自己所冒的风险，我们敬佩他们的勇气。麦克奥莉夫*（McAuliffe）同样是一个有巨大勇气的人，谁能怀疑这点呢？她比我们更迫近地觉察到那真实的危险，NASA的官员本该让我们知道那危险的。

让我们来提出一些忠告，以确保 NASA 的官员能够在现实世界中执行他们的管理任务，确保他们充分了解技术的弱点和缺陷，从而能够积极地去设法消除这些弱点和缺陷。在把航天飞机的成本、效用与其他进入太空的方法进行比较时，他们一定要有现实的态度。在订合同、估算成本、评估项目的困难时，他们一定要有现实的态度。他们只应该提出现实的飞行计划，有合理的实施机会的计划。如果他们这样做仍然得不到政府的支持，那么就让它这样吧。NASA 应该求助于公众，从公众那儿寻求支持，他们的态度应该坦白、诚恳而且具体，这样公众就会作出最明智的决定，以使用他们有限的资源。

对一个成功的技术来说，现实性一定要优先于公共关系，因为自然是不可欺骗的。

* McAuliffe，就是在挑战者号航天飞机上遇难的那位美国女中学教师。——译者

8　什么是科学?

什么是科学？这是常识！真是这样吗？1996 年 4 月，这位杰出的教育家对国家科学教师协会（NSTA）发表了一次演讲，在演讲中他教导他的同行们如何教育学生们像一个科学家那样思考，如何用好奇的眼光、开放的心胸，最主要的是，怀疑的态度观察世界。费曼的父亲——一个制服商人——对费曼看待世界的方式有巨大影响，这个演讲也是对此的一个说明。

感谢德罗斯（DeRose）先生提供这个机会，让我来你们科学教师协会。我也是一个科学教师。我仅仅是在研究生物理教学方面有太多的经验，然而这经验的结果却是使我明白了我自己并不知道该如何去教。

你们是工作在教师系统最底层的真正的教师、教师指导员、课程专家，但我相信你们也清楚自己并不知道该如何去教，要不然你们就无须跑到这儿来参加这个会议了。

“什么是科学”——这个主题不是我选的，这是德罗斯先生出的题目。但是我想说的是，我认为“什么是科学”根本不能等同于“怎么教科学”，我必须提醒你们注意这一点。这有两个理由。首先，从我准备发表这个演讲这个事情本身来看，我好像是要告诉你们怎么教科学——其实我根本没有这个意思，因为我对小孩子一无所知。我自己有一个孩子，我知道我不懂。其次，我想你们大多数人都有某种缺乏自信的感觉（因为这方面有那么多的演讲，那么多的论文和那么多的专家）。你们总是被人教训为什么事情进行得不太好，该怎样学习教得更好一些。我不会斥责你们工作做得不好，我也不会指示你们怎么样就一定能提高教学的效果。这不是我的目的。

实际上，我们招了很好的学生进加州工学院，我们发现这些年来进来的学生越来越优秀了。怎么做到这一点的，我不知道。我想你们也未必知道。我不想干预这个系统，它很好。

仅仅两天之前，我们开了个会议，会上决定不必再在研究生院讲授初等量子力学的课程了。我做学生的时候，甚至研究生院都没有量子力学的课程，他们认为这个课程太难了。我刚开始教学的时候，我们有了量子力学课程。而现在

我们给本科生上这样的课。现在我们发现，我们也不必给从其他学校毕业的学生开初等量子力学的课程了。这课程为什么被推下去了呢？因为我们大学里能够教得更好了。（为什么大学里能够教得更好了呢？）这又是因为升上来的学生得到了更好的训练。

什么是科学？当然，如果你们教科学，你们肯定都知道。这是常识。我为什么这么说呢？如果你不知道（你可以去看教科书），每本教科书的教参里都会对这个问题有完整的讨论。在那里你会读到被片面抽取了出来，在某种程度上是被歪曲了的培根语言，打了折扣然后又混合起来的培根言语，这些数世纪前的培根语言，在当时被当成是关于科学的深刻哲学。但是当时最伟大的实验科学家之一，威廉·哈维*——他是当时真正在做一些事的学者——他说培根所谓的科学，是高贵的大官才能做的科学。他提到了观察，但遗漏了判断观察什么和注意什么这个关键的评判因素。

所以，科学之所是，不是哲学家们所说的那样，当然也不是教参中所说的那样。"科学是什么"，是我在答应做这个讲座之后我给自己设的一个问题。

其后不久，我想起了一首小诗。

一只蜈蚣十分快乐，直到一只蟾蜍来开玩笑
说："嗨，哪只脚先行，哪只脚随后？"
蜈蚣疑惑起来，但始终想不透
它心烦意乱，跌入水沟
却不知道怎么跑

* William Harvey，哈维（1578~1657）发现了人体的循环系统。——编者

我这一生，一直从事科学，也知道什么是科学，但是要我到这里来告诉你们“什么是科学”——哪只脚先行，哪只脚随后——我做不到。而且与诗的类比也让我担心，我担心回家后我就再也不知道怎么做研究了。

已经有各种新闻记者千方百计想得到这个讲座的概要；我只是在很短时间之前才准备这个演讲，所以不可能有什么概要；但是我现在能够看到他们全都冲出去写某种标题，比如说：“费曼教授叫 NSTA 的主席癞蛤蟆。”

这个主题有困难，而我又不喜欢哲学的解释，这种境况下，我要用一个很不平常的方法来表达我的观点。我将告诉你们我是怎么知道科学是什么的。说起来那有一点点孩子气。我童年的时候就学习科学，可以说从一开始它就进入了我的血液。我要告诉你它是如何进入我的血液的。这听起来好像是我要告诉你怎么教科学，但是我的意图并不在此。我是想通过讲我如何知道科学是什么来告诉你科学是什么。

是父亲让我知道了什么是科学。据说——我没有直接听到这段对话——我母亲怀着我的时候，我父亲说，“如果是个男孩，他会成为一个科学家。”他怎么做的呢？他从来没有跟我说我应该做个科学家。他自己不是科学家，他是个商人，一个制服公司的销售经理；但他阅读科学方面的东西，而且喜爱科学。

我很小的时候——这是我所知道的最早的一个故事——在我还站在高椅子上吃饭的时候，父亲晚饭后会和我玩一个游戏。他从长岛市*的某个地方买回来许多长方形旧瓷砖，铺在浴室地面的那种。我们把瓷砖一个接一个拼起来，我可

* Long Island City，在美国纽约州的东南部。——译者

以推最头上的一块，然后看着那整个的一串瓷砖往前滑，滑得越远越好。

再后来，游戏升级了。那些瓷砖有不同的颜色，他要求我放一块白的，两块蓝的，一块白的，两块蓝的，然后又是一块白的，两块蓝的——我也许想再放一块蓝色的，但按他的要求必须是块白色的。我想你们已经领会到了其中隐含的智慧，普通的智慧——先让他喜欢上这游戏，然后慢慢往其中加入教育的因素！

相比之下，我母亲要感性得多。她开始意识到父亲隐藏着的用心，她对父亲说，“麦尔 *，要是这可怜的孩子想放一块蓝的瓷砖，你就让他放吧。”父亲说，“不行，我要他注意图案。这是我唯一所能做的，那是他最初阶段的数学。”如果我是在讲“什么是数学”，我想我已经给了你们答案了。数学就是寻找图案。（实际上，这种教育确实有一些效果。我上幼儿园的时候，我们接受了一个直接的实验考试。那时候我们有编织课。这种课对小孩子来说太难了，现在他们已经取消了这种课。在这课上，我们通常要用彩纸在竖直的带子上编织图案。幼儿园的老师很吃惊，她特地给我家寄了封信，说这孩子很不平常，因为他能提前描述出他想要编织的图案，而且真的编织出令人惊奇的复杂图案。所以，瓷砖游戏对我确实有些作用。）

我再举一个例子来说明数学仅仅是图案。我在康奈尔大学时，对那里的大学生群体特别着迷。在我看来，那是个混合物，一些敏锐之士淹没在一大堆学习家政之类的庸人群中（包括许多女生）。我常常和学生一起坐在咖啡店里，吃点东

* 费曼的父亲名 Melville Feynman，麦尔（Mel）是费曼母亲对他的昵称。——译者

西，随便听听他们聊天，看看他们嘴中能不能出来个把有智慧的词语。你可以想象，当我发现了一件对我来说是极棒的事情时，我是多么惊奇。

我听到两个女孩子的对话，其中一个向另一个解释说，如果你想获得一条直线，你可以这么做，对你所起的每一行，你都向右走一个确定的数值，也就是说，如果你每起一行时都走过一个相同的量，那么你就得到一条直线。一个深奥的解析几何原理！她继续说下去，我简直惊呆了。我以前不知道女性的心智能够理解解析几何。

她继续说，“假设你还有一条直线从另一边过来，然后你想算出这两条直线在何处相交。”假设这条直线，你每向上移动一个 1，你就向右移动了 2；而另一条直线，每向上移动 1，则向右移动 3。它们从相距二十步开始，等等。——我被惊得目瞪口呆。她算出了交点在什么地方！后来我才知道她们谈话的真正内容，是一个女孩在向另一个女孩解释怎么织菱形花纹的鞋垫。

由此我得到一个教训：女性的心智能够理解分析几何。那些数年来坚持认为（面对着所有那些明显是相反的证据）女性有同等的理性思维能力的人们也许真的不无根据。问题也许只是我们还从未找到一种和女性心灵进行交流的方法。如果方法正确的话，你也许能够从中挖掘出一些东西。

好，我继续讲我作为一个数学青年的亲身经验。

我父亲告诉我的另一件事情——我不能很好地解释它，因为这与其说是告诉，还不如说是激励——是所有的圆，不管尺寸多大，其周长与直径的比率都是一样的。对我来说，那并不是太难理解的，但是这比率有一些奇妙的特性，那是

个美妙的数字，一个深奥的数字，pi[*]。作为一个青少年，我当时还不能完全理解这个数字的奥秘，但是这是个异乎寻常的东西，我从此到处留心寻找这个 π。

后来我在小学学习怎么求小数，在学怎么求 $3\frac{1}{8}$ 时，我写下 3.125，并且想，我认出了圆的周长与直径之比——π——的另一种写法。老师把它纠正为 3.1416。

我用这些事情为例来说明一个影响。那儿有个秘密，那儿有个关于数字的疑惑，这个想法——而不是那个数字本身——对我很重要。好久之后，我在实验室——我说的是我自己家里的实验室——做实验，到处胡乱拨弄——不，对不起，我不做实验，从来不做；我只是到处胡乱拨弄。我做收音机和小机械，四处胡乱拨弄。渐渐地，通过书和手册，我开始发现一些适用于电学，把电流和电阻联系起来的公式。有一天，在看一本书上的公式时，我发现了一个振荡电路的频率公式，$2\pi\sqrt{LC}$，其中 L 是电感，C 是环路的电容。这儿有个 π，但是圆在哪儿呢？你们在笑，但是我那时十分严肃。π 原来是和圆相关的一个东西，现在从电路中出来了个 π，那么圆在哪儿？你们这些在笑的人，你们知道这个怎么来的吗？

我不得不爱这个东西，不得不去寻找它，思考它。然后我认识到，线圈当然是做成圆圈型的。大概半年后，我发现了另一本书，书上的电感有的是圆线圈，有的是方线圈，而这些公式中也有 π。我又开始思考，我认识到 π 不是从圆形的线圈来的。现在我对 π 的理解比较好了；但是在我心中，我仍然不太清楚那个圆在哪儿，那个 π 是从哪儿来的。

* 希腊字母 π。——编者

我想就语言和定义的问题说几句——我要中断一下我的小故事——因为我们必须了解语言。语言不是科学。但这并不是说，仅仅因为它不是科学，所以我们就可以不教语言。我们不是在谈怎么教；我们是在谈什么是科学。知道怎么把摄氏度转换成华氏度这不是科学。这种转换是必要的，但这不是严格的科学。同样，如果你在讨论什么是艺术，你不会说，艺术是关于 3B 铅笔比 2B 铅笔柔软这一事实的知识。两者显然是不同的。(当然，) 这并不是说艺术教师不该教关于铅笔的知识，也不是说艺术家没有这个知识也会做得很好。（其实，你只要试一下，一分钟之内就能发现这个事实；但是这是个科学的方法，艺术教师可能不会想到要去解释它。）

为了相互交谈，我们不得不有语言，这没有问题。想看看其间有什么不同，这个想法很好；想知道我们什么时候是在教科学的工具，比如语言，什么时候是在教科学本身，这个想法也很好。

为了把我的想法表达得更清楚一些，我要挑出一本科学书籍来批评其中我不能赞同的地方。(对这本书来说，) 这是不公平的，因为我相信，只需一点点机敏，我同样能在其他的书中找到不能赞同的东西来批评。

有一本一年级的科学书，其第一课开始讲科学，但它讲的方式非常令人遗憾，因为它是从一个错误的观点出发的，这个错误的观点就是关于什么是科学的。书上有一只狗的图片，那是一只可以上发条的玩具狗，一只手伸向发条，然后这狗就能运动。最后一张图的下面写道，“什么使它运动？”接着，有一张真狗的图片和“什么使它运动？”的问题，然后又有一张摩托车的图片和“什么使它运动？”的问题，如此等等。

一开始我以为他们是在准备介绍科学讲些什么：物理，生物，化学。但不是。我要找的答案在这本书的教参中，答案是“能量使它运动。”

能量是个很难捉摸的概念，很难、很难把握得正确。我的意思是，关于能量这个概念，不容易理解到能够正确使用它的程度，以使你能够用能量观点正确地推导一些东西。它超出了一年级的能力。（对那个问题，）你同样也可以回答，比如“上帝使它运动，”或“精神使它运动，”或“运动能力使它运动”。（这样回答实际上和说“能量使它停止”一样好。）

我们这么来看它：那只是能量的定义。它应该反过来。我们应该说“如果某个东西能运动，它里面含有能量”，而不是“使它运动的是能量”。这是个微妙的差别。惯性命题也一样。为了把这个差别说得更清楚一点，也许我可以这么说：

假如你问一个孩子是什么使玩具狗运动，假如你问一个普通人是什么使玩具狗运动，这其实是你应该思考的问题。答案是：你拧上发条；发条要松下来，于是推动了齿轮。这是多么好的一个开始科学课程的方法！拆开玩具，看看它是怎么工作的。观察齿轮中的技巧，观察棘轮。学习一些关于这个玩具的东西，安装玩具的方法，人们设计棘轮等东西的巧智。这就行了。（那本科学教科书上的）问题是好的，答案则未免有点遗憾，因为他们想讲能量的定义，但是学生什么也没学到。

设想一下，假如一个学生这么说：“我不认为是能量使它运动。”你如何从这儿讨论下去呢？

我最终想出了一个方法，可以检测你究竟是传授了一个

思想还是讲授了一个概念。我们这么来检测：你说，“不要用你刚学到的新词，用你自己的语言复述一下你刚学到的内容。”“不要用‘能量’这个词，请告诉我，关于狗的运动你现在知道些什么？”如果你不会说，说明你除了概念之外什么也没学到。关于科学你什么也没学到。这也许还没什么。你也许随即就不想学习关于科学的东西了。你不得不学习许多定义。对于刚刚开始的第一课，这岂不是一个毁灭性的灾难？

我认为，在第一课上就为了回答问题而学习一个神秘公式，这太糟糕了。那书上还有其他的——“重力使它下落”；“你的鞋底穿了，是因为摩擦。”鞋革穿破，是因为它擦着人行道，人行道上的小坑槽和小突起抓住一片片小皮并把它们扯了下来。简单地说是因为摩擦力，这令人沮丧，因为这不是科学。

我父亲也稍微讲过一点能量的问题，在我对之有了一点感觉之后，他也用能量这个词。假如他要给我讲解能量问题，我想他会这么做——他确实做过与此性质相同的事，虽然他所举的例子不是玩具狗。如果他真的拿玩具狗做例子，他会说，“它动，是因为阳光的照射。”我会说，“不。这和太阳的照射有什么关系？它动，是因为我给它上了发条。”

“那么，小朋友，你为什么能够上这个发条呢？”

“我吃东西。”

“你吃什么，朋友？”

“我吃庄稼。”

“庄稼怎么长起来的？”

“因为阳光的照射。”

狗也是这样。石油呢？那是太阳能的积累，植物吸收太

阳能并把它保存在地下。其他东西也一样，最终都和太阳有关。你看，同样一个关于自然界的思想，我们教科书上表述得那么死板，这里却讲得这么生动。我们看到的所有运动着的东西，它们所以能够运动都是因为阳光的照射。这确实解释了一种能量与另一种能量之间的关系。但是孩子也可以不接受这样的解释，他会说，“我认为这不是因为阳光的照射。”然后你可以展开一个讨论。你可以看出这里有个区别。（稍后我可能向他提出潮汐问题，以及什么使地球转动，这样我就又触及一个神秘的问题了。）

这只是一个例子，说明定义和科学的不同。定义是必不可少的，我们反对的只是在第一课上就讲定义。到后面肯定要引入定义告诉你什么是能量，而不是针对像“什么使狗运动”这样一个简单问题。对孩子应该给出孩子式的答案，“拆开它，我们来看看里面有什么。”

和父亲在树林里散步期间，我学到了许多东西。比如关于鸟：他不会忙着告诉我鸟的名字，而是说，“看，那鸟总是啄自己的羽毛。它常常花很长时间啄羽毛。想想看，它为什么啄羽毛？”

我猜想是羽毛乱了，它想理顺乱了的羽毛。他说，“那么，鸟的羽毛什么时候会乱？或者，它的羽毛为什么会乱？”

“飞的时候。它在地上走的时候，羽毛不会乱。但是飞的时候，羽毛就乱了。”

然后他会说，“那么你是猜想鸟刚着陆时啄羽毛的机会要多一些，而它理顺羽毛之后在地上走来走去时啄羽毛的机会要少一些。好，我们就来看看。”

于是我们就看，观察。我观察到的结果证明，鸟不只是在刚刚飞了之后才啄羽毛，不管它已经在地上停留了多久，

它一样要啄羽毛，而且啄羽毛的次数和时间并不比刚歇下来时少。

所以我的猜想是错了。我猜不出真正的原因，还是父亲给我解开了谜底。

因为鸟身上有虱子。这儿有羽毛上掉下来的一个小屑片，父亲告诉我说这东西可以吃，虱子就吃这东西。虱子身上有一小块蜡，是从虱子腿弯处冒出来的。在那里有一只蛆，靠吃蜡生活。蛆在那里有这么好的食物资源，以致消化不良，因此从它的尾部就流出一些液状物，这些液状物中含有丰富的糖，有一种小生物就生活在这糖里面，等等。

（父亲所说的这些，）事实虽不正确，但其中的精神是对的。首先，我从这里了解到了寄生现象，一个生活在另一个身上，另一个身上，另一个身上。

其次，他接着说，在自然界，只要有某种可吃的资源维持生命，就会有某种形式的生命找到一个利用这种资源的方法，而且每一小点剩余物都会有东西来吃。

这里的要点是，即使我还不能达到最终的结论，这观察的结果都是一块美妙的金子，带着奇妙的结果。这是某种奇妙的东西。

你们假设一下，如果他要求我去观察，要求我制一个目录，要求我记下观察的结果，去做这事，去看；而如果我真的写下目录，那么笔记本的后面将是个由 130 个其他目录组成的目录。如果这样的话，我就会觉得那观察的结果相对来说有些乏味了，从中不会得到多少东西。

我认为，如果你想教导别人去观察，你得让他相信观察中会有美妙的东西出现。这一点很重要——至少对我来说很重要。我在那时懂得了科学是干什么的。那是耐心。如果你

看，你观察，你用心，你会从中得到辉煌的回报（虽然有可能不是每次都有这样的回报）。因为有这些经历，所以当我更成熟一些时，我会专心致志地钻研问题，一个小时接着一个小时地工作，持续数年——有时是许多年，有时时间短一些其中有许多都失败了，大量的东西进了废纸篓；但偶尔也有一个新的理解的闪光，那是我童年时就已知道期望的。因为我知道观察是值得花费精力的。

顺便说说，我们在森林里还学到了一些其他东西。我们会出去散步，然后看见各种规则的东西，我们会谈论许多东西。我们谈生长着的植物，谈树争取阳光的斗争，它们如何努力着尽可能长高；高于35或40英尺时，它们如何努力解决吸水问题；谈地上的小植物寻求漏下来的一点点阳光……所有的生长，等等。

在我们已经看了所有这些以后，有一天，父亲又带我去森林，并说："这段时间我们都在观察森林，但是我们所看到的仅仅是这里正在发生着的事情的一半，正好一半。"

我说，"什么意思？"

他说，"我们已经看了所有这些东西如何生长；但是为了每一点生长，一定得有等量的腐损，否则物质将被永远耗尽。如果枯死的树用光了空气和土壤中的物质，却仍然树在那儿不腐败，那么它就不能回到土壤或空气中去，而其他东西也就不可能生长，因为土壤和空气中没有可用的物质了。"所以，对应着每一点生长，必定有等量的腐损。

然后我们又频频进入树林散步；我们扒开旧树桩，看里面有趣的小虫子和菌类的生长——他当然不可能指给我看细菌，但是我们看到了细菌的软化效果。因此在我眼里，森林就是一个物质不断转化的过程。

父亲还用他奇特的方式描述许多事情。他经常以这样的方式开始谈一个东西：“你想象一个火星人要下来看这世界。”这是个很好的看世界的方法。比如在我玩电动火车的时候，他告诉我说，有一个被水冲着转的大轮子，它上面连着许多细铜线，这些细铜线向外延伸、延伸，向各个方向延伸；这些铜线的另一端有许多小轮子，当大轮子转动时，所有的那些小轮子也转动起来。大轮子和小轮子之间只有铜（线）和铁（线），没有其他东西，没有动的东西。你在这儿转动一个大轮子，各个地方的所有小轮子也跟着转起来；你手上的火车就是其中的一个小轮子。父亲告诉我的就是这么一个奇妙的世界。[……]

什么是科学，我想，科学也许是这样的一个东西：在这个星球上，生命进化到了这样一个阶段——出现了有智慧的动物，进化了的动物。我不是指人类，而是指那些有游戏活动，并且能从经验中学到一些东西的动物（比如猫）。但是在这个阶段，每个动物只能从它自身的经验中学习。它们渐渐发展，某些动物学习得更快了，甚至能够通过观察学习其他动物的经验，或者这个动物能够教导另一个动物，或者这一个能够看到另一个所做的事情。于是有了这样的可能：可能所有的动物都学习它，但是传授没有效率，而且它们可能死亡；也许学习的那个动物在它能够（把经验）传授给其他动物之前也死掉了。

问题是，可不可能学得更快一些？那些偶尔学到的东西，可能因为学习者的记忆不好，也可能因为学习者或发明者的死亡而被遗忘。有没有可能学习的效率比遗忘的效率快一些？

于是到了这样一个时期，可能这时某些种类动物的学习效率提升到了这样一个高度，突然之间一个全新的事情发生了：某个动物学会了一些事情，又传授给另一个，另一个，传授的速度之快，足以使之不会从这个族类丢失。于是这个族类的知识就可能积累起来。

这种现象被称为世代传递性 *。我不知道是谁首先这么叫的，不管怎么说，我们这里有些那种动物的实例，他们就坐在这儿，想把这个经验和那个经验连接起来，每一个都想从另一个那儿学习。拥有种族的记忆，拥有积累起来的知识，而这些知识又可以从这一代传递到另一代，这是自然界的一个新现象。但是这其中也有一个弊端，因为有可能传递错误的思想，即可能传递对这个种族没有益处的思想。这个种族有思想，但这些思想不一定有益。

于是又到了一个时期，这时思想不仅仅是实践的积累，不仅仅是有用的东西的积累，而是各种偏见，各种奇怪的、古怪的信仰的大积累——尽管是非常缓慢地积累起来的。

然后，人们就发现了一个避免这弊端的途径。这就是怀疑，怀疑从过去传下来的东西是不是真的正确，因而想重新由经验找出事情的真相，而不是照它流传下来的样子相信过去的经验。这就是科学：有必要以新的直接的经验重新检验发现的结果，而不是一味信任从前代而来的种族经验。我就是这么看的，这是我对科学最好的定义。

为了给你们点热情，我想提醒你们一些大家都很了解的事情。宗教里教诲道德课，但他们不是只教一次——他们反复鼓舞你。我想科学也要这样，必须通过不同的途径向孩

* time-binding：指人类能以记号保存回忆和经验供后代用的一种特有活动。——译者

子、大人，向每个人反复宣扬，让他们记着科学的价值。我们这样做的目的，不仅仅是为了能够更好地做一个公民，或者更有能力控制自然等等。还有一些其他的事情。

这里面还牵涉到诞生于科学的世界观的价值。从这些新经验所得的结果中，可以发现自然的美与妙。即是说，我刚刚向你们提及的那些内容所具有的神奇和美妙：物体所以运动，是因为太阳的闪耀。这是个深刻的思想，很奇怪，也很美妙。（当然，并不是所有的东西的运动都是因为太阳在闪耀。地球的自转就和太阳的闪耀无关；还有，近来的核反应在地球上产生能量，这是个新能源。一般来说，也许火山也是源于一种不同于太阳的新能源。）

学习科学之后，我们眼中的世界就变得很不一样了。举例来说，我们知道了树木主要是从空气来的。树木燃烧的时候，它们返回空气；而燃烧中释放的热量，正是来自太阳的热量，它们曾被用来把空气转换成树。那最后剩下来的一小部分灰烬，不是来自空气，而是来自土壤。

这些都是很美的事情，科学内容中充满了这些美妙的东西。它们很有鼓舞力，也可以用来鼓舞他人。

科学的另一个品质，是倡导理性思考的价值，就像它倡导自由思考的重要性一样；倡导由怀疑前人给我们的教训是否都正确而得来的积极成果。在这里，你一定要把科学与偶尔用来发展科学的形式或程序区别开来，特别是在教学中，一定要区分二者的不同。简单地说“我们写（计划），实验，观察，做这做那”，这很容易，你可以很精确地复制这形式。但是，正是因为追逐形式而不记住伟大领导者的直接教诲，原本伟大的宗教最终消失了。同样，我们也可能追逐科学的形式并称之为科学，而实际上那只是伪科学。因为追寻科学

的形式，我们都在遭受我们今天的许多研究所所具有的那种专制的折磨，这些研究所如今已处在伪科学顾问们的影响之下。

比如，我们对教学做过许多研究，人们对之进行观察，制目录，统计，但是教学并未能因此就成为公认的科学，公认的知识。它们纯粹是科学的一个形式模仿——就好像南海岛民用木头建飞机场、无线电塔，期望着一架大飞机的来临。他们甚至制造木质的飞机，外形与他们在周围外国人的飞机场上所见到的飞机一模一样，但是奇怪的是，它们就是不能飞！这种伪科学的模仿，其结果是生产专家，正好你们当中许多人是教育专家。你们这些教师，真正在最基层教孩子们的教师，你们也许偶尔也会怀疑专家。但是从科学的角度，你们必须怀疑专家。实际上，我还可以从另一个角度来定义科学：科学就是坚信专家是无知的。

当一个人说科学教导我们这教导我们那时，他对“科学”这个词的使用是不正确的。科学并不教这教那，是经验教这教那。如果他们对你说科学已经表明什么什么，你应该这样回答：“科学怎么表明这个了——科学家是怎么发现这个的——如何，什么，哪儿？”不是科学已经表明，而是这实验，这结果已经表明。你和任何其他人一样，你有同样的权利，在听取实验的基础上（但是我们一定要倾听所有的证据），自己去判断是否已经达到了一个可以重复使用的结论。

在一个真正的科学还不能到达的复杂领域，我们不得不信赖一种古老的智慧：绝对的坦率之王。我想鼓励基层的教师们，你们要乐观一点，要有一些通常意义上的自信和平常的智慧。你们要知道，指导你们的专家也许是错误的。

我或许已经破坏了教育秩序，将来进加州理工学院的学

生也许不会再这么优秀了。我认为我们是生活在一个非科学的时代，几乎所有通讯和电视语言、书籍等等所带来的冲击都是不科学的。这并不是说它们不好，而是说它们不科学。因此，也就有了大量打着科学旗号的智力专制。

说到底，人不可能永生。每代人都从他们自己的经验中发现了一些东西，他们必须要把他们的发现传递给下一代；但是这种传递必须在尊重和不敬之间保持微妙的平衡，以免这个种族（它现在已经知道自己容易患的毛病）把它的错误过分僵化地强塞给它的青年。但是一个种族确实传递它所积累的智慧，还有那些也许不是智慧的智慧。

我们既要教如何接受前人，也要教如何拒绝前人，必须在两者之间保持一种平衡，这需要相当的技巧。独立于所有其他科目的科学，在其自身之中内含着这样的教训：认为前代的大师绝无错误，这样的信念是很危险的。

各位继续努力。谢谢。

9　世上最聪明的人

这是1979年Omni杂志对费曼的精彩访谈，费曼谈了他最了解和最喜欢的物理学和他最不喜欢的哲学。(“哲学家应该学会嘲笑自己。”)这里，费曼讨论了为他赢得诺贝尔奖的工作，量子电动力学(QED)；接着又谈到宇宙论，夸克，以及那些使许多方程陷入困境的可恶的无限性。

“我觉得这个理论只是把困难扫到地毯下去的一种方法，”费曼说。“当然，是否如此，我不能确信。”这听起来好像是在一个科学论坛上，一篇有争议的论文提交上来后，听众所发表的一种礼貌性的温和批评。但是这是费曼作为诺贝尔奖获得者在台上发表演讲。他所质疑的理论，量子电动力学，最近被誉为“人们所发明的最精确的理论”；它的预言通常能在百万分之一的精度上得到验证。20 世纪 80 年代，当费曼、施温格、朝永振一郎分别独立地发现这个理论时，同行们为之欢呼，称之为“大扫除”：长期遗留问题的一个解决，以及 20 世纪物理学领域内两个伟大思想——相对论和量子力学——的完美结合。

通贯其整个科学生涯，费曼一直把理论的天才与不敬的怀疑主义结合在一起。1942 年，在普林斯顿跟随约翰惠勒（John Wheeler）获得博士学位之后，费曼被囊括进了曼哈顿计划。在洛斯-阿拉莫斯，费曼是个 25 岁的杰出青年，他既不敬畏身边的物理巨匠（玻尔，费米，贝蒂），也不敬畏这个计划的绝密机制。他开保险柜的能力令所有安全人员垂头丧气——有时候他是听锁机件的微小运动，有时候则猜保险柜主人选择哪个物理常数作密码。（那以后费曼再也没有改掉这个爱好；许多他在加州理工学院的学生，在学得物理的同时，也学到了开保险柜的技术。）

战后，费曼在康奈尔大学工作。如他在这个访谈中所述，在那儿是贝蒂触发了他解决“无限性问题”的思想。30 年来，氢原子电子的精细能级和电子间力（运动如此之快，不能不考虑相对论性交换）一直是物理研究的前沿课题。物理学的理论断言，每个电子周围都环绕着倏忽的“虚粒子”，“虚粒子”的质能是从真空中积聚来的；这些虚粒子又积聚

其他的虚粒子——结果形成一个数学雪崩，这预示着每个电子都有无限的电量。1943 年，朝永振一郎提出了解决这问题的一个方法；正当费曼在康奈尔、史温格在哈佛也迈出了相同的决定性一步之时，朝永振一郎的想法也发表了。三个人因此分享了 1965 年的诺贝尔物理学奖。那时，费曼的数学工具，“费曼整数”，以及他为探讨粒子相互作用而发明的图表，已经成为每个理论物理学家的装备的一部分。数学家斯坦尼斯劳·乌拉姆（Stanislaw Ulam），洛斯-阿拉莫斯的另一位老将，称赞费曼图 * 是“一种能够在许多方向上推动思想发展的符号，将被证明是有用的，甚至是奇妙的、确定无疑的。”例如逆时间方向走的粒子的思想就是从这个符号发展出来的。

1950 年，费曼转到帕萨迪纳的加州理工学院。他的口音仍然是显而易见的纽约口音，但南方的加利福尼亚似乎是个适合他居住的地方。在他的同事们所讲的“费曼故事”中，他对拉斯维加斯的喜爱以及他的夜生活总是占了很大的一部分。“我夫人难以相信我真的会接受邀请，去一个不得不穿晚礼服的地方发表一次演讲，”他说。“我确实改变了两次心思。”在《费曼物理学讲义》——自从 1963 年结集出版，这本书被广泛用作大学课本——的序言中，他的形象是敲着康茄舞 ** 鼓，狂热地咧嘴大笑。（据说在邦戈 *** 上，他能够一只手敲十下，同时另一只手敲十一下；你自己试一试，也许你得承认，相比之下还是量子电动力学容易一些。）

* 这种数学工具以费曼的名字命名，通行的称谓是 Feynman Diagram。——译者

** conga 起源于拉丁美洲的一种舞。——译者

*** bongo，一种用手指敲的小鼓。——译者

费曼的其他成就，还有他在理解氦的超低温相变方面的贡献，以及他和加州理工学院的同事默里·盖尔曼[*]对原子核β衰变理论的研究。他指出，这两个课题距离其最终解决还很遥远；他甚至毫不犹豫地把量子电动力学本身称为“赝品”，因为它留下了重要的逻辑问题没有能够解决。什么样的人能够做那么杰出的科学工作，同时又守护着最具渗透力的怀疑精神？请读下文，找出答案。

Omni：对于局外人来说，高能物理的目标似乎是要去发现物质的终极要素。这种寻求，我们似乎可以追溯到古希腊的原子，可分裂的粒子。但是，利用大的加速器，你们得到比着手处理的粒子更结实的碎片，也许夸克是永远不可能再分的了。对于我们的终极寻求来说，这意味着什么呢？

费曼：我不认为高能物理是那样一种寻求。是哲学家们试图发现自然如何行为；他们可能草率地谈论某种“终极粒子”，因为一眼看上去自然界正是这样的，但是……假设人们在探索一个新大陆，啊？他们看见水沿着地面流过来，他们以前已经见过这东西，他们叫它“河流”。于是他们说他们是在探索，寻找源头。他们沿河向上游走，坚信这河的源头一定在那儿，一切进行得很顺利。但是你瞧，他们向上游走了足够远，却发现整个系统不一样：那儿是个很大的湖或泉，或者那河流是循环的一个圆圈。你可能说，“啊哈，他们失败了！”但是，根本不是！他们做这事的真正原因是探索这片陆地，如果事实证明没有一个水源头，他们在自我解释时可能会为自己的草率微微有点尴尬，但仅仅是感到一点

* Murray Gell-Mann（1929~），因为在基本粒子的分类及其相互作用方面的贡献和发现，获 1969 年诺贝尔物理学奖。1954 年 Gell-Mann 和 G. Zweig 引入了夸克概念。——编者

点尴尬而已，别无其他。只要事物的构成方式看起来像是圆圈中有圆圈，那么你就要去寻找最里面的圆圈——但是它也许不是这种构成方式，这种情况下，你是在寻找“它到底是什么”这个答案。

Omni：但是对你将会发现什么，你的确得有所预想；那儿一定是桥梁和山谷，等等……

费曼：是，但是假如你到了那儿，发现全是云，那怎么样呢？你可以期望确定的东西，你可以找出分水岭布局的法则；但是假如你发现那是一种雾，也许，正有东西从中凝结出来，无法区分陆地和空气，那怎么样呢？你开始时所有的整个想法全消失了！这样刺激的事情时常发生。如果一个人说，“我们要去寻找终极粒子，或统一场定理”，或者任何确定的东西，那他就未免太自以为是了。假如结果出乎意料的话，科学家甚至更高兴。你想他会说，“噢，这不是我所希望的，这儿没有终极粒子，我不想去探究它”？不，他会说，“那么它到底是什么呢？”

Omni：你更希望看到发生这种事情？

费曼：我宁愿说这对我没有什么影响：我得到我所得到的。况且你也不能说它总是会出乎意料。几年前我非常怀疑规范理论*，部分是因为我希望强相互作用与电动力学的不同比它现在所表现出的不同更大一些。我期望雾，而现在它看起来毕竟像是桥梁或山谷。

Omni：物理理论会继续变得越来越抽象，越来越数学化吗？在今天，可不可能有一个理论家，像 19 世纪早期的法拉第那样，不精于数学，但对物理有一种非凡的直觉？

* 描述亚原子粒子间各种相互作用的粒子物理理论。——编者

费曼：我认为可能性很小。首先，仅仅是为了理解迄今为止已有的成果，你就需要数学。另外，与我们大脑适于处理的那些行为相比，亚原子核系统的行为实在太奇怪了，对它的分析不得不十分抽象：为了理解冰，你不得不理解本身与冰很不相像的东西。法拉第的模型是力学的——弹簧，电线，空中拉紧的带子——而且他的“像”是从基础几何来的。我认为，我们已经理解了所有从这个视角我们所能理解的；而我们本世纪所发现的东西非常不一样，非常晦涩，更深一层的进展需要大量的数学。

Omni：这会限制一些人不能从事物理的工作，甚至理解所在进行的研究吧？

费曼：也许有人能发展出一套思考那些问题的方法，能够帮助我们更容易地理解那些问题。也许他们只是把教那课程的时间越来越提前。其实，那些所谓“深奥”的数学并不真的那么难。比如像计算机程序这一类的东西，它们需要严密的逻辑——在过去，爸爸妈妈会说这一类思维只有教授才用到，但是现在它已成为许多日常活动的一部分，成了一种谋生手段；他们的孩子迷上了计算机并且拥有一台计算机，在计算机上做最疯狂、最美妙的事情！

Omni：……每张纸板火柴上都有程序学校的广告！

费曼：对。我不相信那样的观点，说只有少数特殊的人能够理解数学，其他人都是常人。数学是人类的一个发明，它不会比人类所能理解的更复杂。我有过一本微分书，上面说，“一个傻子能做的，另一个也能做。”关于自然，我们已经有能力计算出来的那些东西，对不研究它的人来说，看起来也许比较抽象、吓人；但是是傻子们做的这些事情，到下一代，所有的傻子都将能够理解它。

这方面，人们总有一种浮夸或炫耀的倾向，总有一种把事情弄得艰奥深刻些的倾向。我儿子选了一门哲学的课程，昨天夜里我们一起看斯宾诺莎写的东西——那些最幼稚的推理！全是那些属性呀，物质呀，到处都是这些无意义的反复。我们开始发笑。哦，我们怎么能这样呢？我们面前的可是伟大的德国哲学家，而我们竟然嘲笑他。因为我们找不到原谅他的理由！与他同时代的有牛顿，有研究血液循环的哈维，这些掌握了分析法的人，正在用分析的方法取得进步！但是你拿任何一个斯宾诺莎的命题，再拿一个与之相反的命题，然后对照这世界——你无法判断哪一个正确。他们确实令人敬畏，因为他们有勇气去研究这些伟大问题，但是假如你在这问题上不能有一点成就，你的这种勇气就没有什么价值。

Omni：在你已经发表的演讲中，非常多地涉及了哲学家对科学的评论……

费曼：招惹我的不是哲学，而是浮夸。如果他们只嘲笑他们自己，如果他们只是说，“我觉得它是像这样子的，但是冯·莱比锡认为它是像那样子的，而且他还对之做了个不错的尝试。”如果他们能够解释说，“这是我们最好的猜想……”但是他们几乎没人这么做。相反，他们抓住世上也许没有什么终极的基本粒子这样一种可能，说你们应该停止这种工作，去沉思伟大的、深奥的问题。“你们思考不够深入，先让我来给你定义一下这个世界。”可是我不需要定义，我要去探究它。

Omni：你怎么知道什么样的问题适宜于你去努力？

费曼：我读中学的时候，就有了这么一个观念：你可能感受一个问题的重要性，这种感觉转过来又增加你解决这个

问题的机会。你知道一个有学术思想的人是什么样子？他喜欢看好每一件事……总之，如果你能够把这些因素正确地结合起来，你就不会在一个深刻问题上耗费生命而一无所获，或者在大量别人也能做的小问题上浪费生命。

Omni：我们来谈谈让你和施温格、朝永振一郎获得诺贝尔奖的那个问题。三种不同的途径：解决那问题的时机特别成熟吗？

费曼：20 世纪 20 年代后期，就在量子力学出现之后，狄拉克等人发明了量子电动力学。在他们手里，量子电动力学已经能够做到基本正确，但是当你想计算出结果时，你就会陷入很难解的复杂方程。你可以得到一个不错的一级近似值，但是当你想用修正项进一步精确它时，这些无限量就开始冒出来了。20 年来，大家都知道有这么一个问题，所有量子理论书籍的后面都会提出这个问题。

后来，我们得到了兰姆 * 和卢瑟福 ** 关于氦原子中电子能移的实验结果。直到那个时候，量子电动力学粗糙的理论预测还是足够好的，但是现在你有了一个非常精确的数据：1060 兆周什么的。于是大家都说，该死的，一定得解决这个问题……他们早就知道那理论有问题，现在又有了这么一个非常精确的数据。

于是汉斯·贝蒂利用这个数据，就如何通过从那个效应中减除这个效应以使那些趋向无限的量突然停止作了一些评估。结果发现它们可能在这个量级上停止，他公布了 1000

* Willis Lamb（1913~），因为发现氢光谱的精细结构而获得 1955 年诺贝尔物理学奖。——编者

** Rutherford，欧内斯特·卢瑟福议长，第一个纳尔逊卢瑟福男爵（1871~1937，他因为在元素分裂、放射性元素化学方面的研究而获得 1908 年诺贝尔化学奖。——编者

兆周时的情况。我记得，他邀请了一些人去他康奈尔的家中参加一个舞会，但他又被人打电话叫走，去咨询一些事情。晚会过程中，他打电话告诉我说他在火车上已经把它算出来了。回来之后他就此发表了一个演讲，说明为什么这个减除步骤能够避免无限，但是听起来还是很玄，令人困惑。他说希望有人能够说明怎样才可以把它消除干净。我后来去找他，说，“啊，这容易，我能做到。”看，我在麻省理工学院读四年级的时候，就开始对此有想法了。我那时甚至虚构了一个答案——当然，是错的。你看，这就是施温格、朝永振一郎和我切入这个问题的切入点，发展一种方法把这种程序转化成可靠的分析——自始至终技术性地保持相对论不变性。朝永振一郎已经提议如何解决这问题，同时施温格也正在发展他自己的方法。

于是我带上自己的解决方案去见贝蒂。滑稽的是，我那时根本不知道怎么做这领域里的、哪怕是最简单的问题——我早就应该学了，但是我当时正沉迷于搞自己的理论——所以我不知道怎么验证我的想法是否可行。我们一起在黑板上做，最后发现它不对，甚至还不如以前的那个方法。回到家，我想之又想，下定决心一定要学会解答实例。我就这么去做了，然后又回去找贝蒂。我们试了一下，行了！直到现在，我们也没能找出第一次出错的原因……可能是某个偶然的失误。

Omni：这阻碍了你多长时间？

费曼：不长，大概一个月。这对我也有好处，因为我重新仔细检查了我所做的，确信它肯定有效，而且我为了使事情简明直接而发明的那些图表真的很好。

Omni：你那时想过它们会被称为“费曼图”，或被收进

书里去吗？

费曼：不，没有——我确实记得有那么一刻。我穿着睡衣在地板上工作，四周到处是纸，那些有趣的有形图表，由点子组成，里面又伸出线条。我自言自语：要是这些表真的有用，然后其他人开始使用它们，《物理评论》不得不印刷这些愚蠢的图片，这不很滑稽吗？当然，我不能预见这些——首先，我完全不知道这些图有多少会出现在《物理评论》上；其次，我从未想象每个人都使用它们，如果这样，它们就不再好玩了……

[这时，访谈转移到费曼教授的办公室继续进行。在那里，磁带录音机拒绝重新开始工作，电线、电源开关、录音键，一切正常；然后费曼建议把磁带拿出来重新放一下。]

费曼：看，你一定要了解这世界。物理学家就了解这世界。

Omni：拆开，再装起来？

费曼：是。（物理学中）总有一点渣滓，比如无限量什么的。

Omni：我们接着上面说。你在演讲中说我们的物理理论在统一各种层次的现象这方面向来做得比较好，然而 X-射线、介子或其他类似的东西出现了："各个方向上总是要挂出许多线头。"在今天的物理学中，你看到了哪些松散的线头？

费曼：自然界有大量的粒子：规范理论虽然给出了粒子间相互作用的美丽图景，但是没有能够解释粒子的种类为什么如此之多，而我们需要理解这一堆无规则的数字。对于强相互作用，我们有色子*和胶子理论，这理论表述得很精确

* "色（Color）"确实是科学家为夸克和胶子的一种特性所起的名字，不是因为它们真的有什么颜色，而是因为找不到更好的名字来称谓基本粒子的一种新特性。——编者

也很完备，但是几乎没有能够给出任何重要的预言。从技术上来说，这个理论很难得到一个很强的检验，这是一个挑战。我强烈地感觉到那是个松散的线头；如果没有与理论相冲突的证据，我们别想取得大的进步，除非我们能够用很强的数据检验这理论所作出的很强的预言。

Omni：宇宙学方面的情况怎么样？狄拉克暗示基础常数是随时间而改变的，这是否是说物理定理在大尺度上会有所不同？

费曼：说到这个，问题就多了。迄今为止，物理学一直想发现自然的定律和常数，而不问它们从哪里来，但是现在我们也许到了不得不反思的时刻了。

Omni：你对此有何建议？

费曼：没有。

Omni：一点也没有？连一点倾向都没有？

费曼：真的没有。几乎对每一件事，我都是这个态度。在前面，你没有问我是否认为存在一种基本粒子，或者它是不是根本就是雾。如果你问我这问题，我会告诉你我对此毫无想法。那么，为了能够努力研究某个东西，你不得不让你自己相信有一个答案在那儿，这样你就会在那儿努力挖掘。是不是？所以你临时给了自己一个预设或者偏见——但是整个过程中，你在心底其实是发笑的。忘掉你所听到的科学无偏见的那些话！在这里，在一个讲大道理的访谈里，我不带偏见——但是在我工作的时候，我有许多偏见。

Omni：什么样的偏见，喜欢……什么？对称性，简单性……？

费曼：这要看我当天的心情如何。今天我接受某一类确定的、大家都相信的对称；第二天我又想去弄明白，如果不

是这样，会产生什么结果——除我之外，大家都会疯。但是杰出科学家的不同寻常之处，正在于他们不管做什么事，都不像其他人通常的那样过分相信自己。他们能够始终保持怀疑而不会有所不安，他们总是在想“也许是这样”，并且以这种态度行事，他们时时刻刻都清楚这仅仅是“也许”。许多人发现这很困难，他们认为这意味着超然或冷漠。这不是冷漠！这是更为深刻、更为热情的理解；这意味着你可能正在某个你以为能够发现答案的地方挖掘，然后有人跑过来说，“你还没看见他们在那边拿出的东西吗？”然后你抬头看看，说“呀！我挖错了地方。”这种事情随时都可能发生。

Omni：还有另一件事，好像也经常发生在近代物理学上：多种先前的“纯”数学，近代物理中却发现了它们的应用，例如矩阵代数或集体疗法。是现在的物理学家比以前更善于接受？还是时滞缩短了？

费曼：从来就没有什么时滞。拿汉密尔顿 * 的四元数来说：物理学家抛弃了这个十分有力的数学系统的大部分，只留了其中的一块——从数学上讲几乎是毫无价值的一块——这一块后来变成了向量分析。但是当量子力学需要四元数的所有火力时，泡利 ** 当场就以一个新形式改创了这系统。你可以往回看，说泡利的旋转矩阵和算子不是什么新东西，而正是汉密尔顿的四元数……但是即使物理学家已经把这个系统牢记了 90 年，其意义也和牢记几个星期并没有多大的不同。

---

* Sir William Rowan Hamilton，威廉·汝恩·汉密尔顿爵士（1805~1865）爱尔兰数学家，他发明了四元数，张量和向量分析的一个替换结构。——编者

** Wolfgang Pauli，沃尔夫刚·泡利（1900~1958），因为发现了不相容原理而获得 1945 年诺贝尔物理学奖。——编者

比如你得了一个病，沃纳的肉芽肿病或其他什么的，从此以后你留心去医学参考书上查寻这个病。然后你会清楚地发现，你对这个病的了解，比你的医生对这病的了解还要多，虽然他在医学院花了那么多时间……明白吗？学习某个专门的、有限的主题，要比学习整个领域容易得多。数学家们是在所有的方向上进行探索。对一个物理学家来说，补充一个他所需要的东西，要比跟上所有可能有用的东西快。我前面提到的那个问题，夸克理论方程所面临的困难——它是物理学家的一个问题，我们想要去解决它，在我们解决它的时候，我们也许是在做数学。这是个令人惊异的事，我不理解的是，在群论出现于物理学中之前，数学家们就已经对之进行了研究——但是考虑到物理学的发展速度，我并不认为他们的研究真的那么重要。

Omni：再问一个你演讲中提到的问题。你曾说“在下一个人类智慧苏醒的伟大时代，很可能会产生一种理解方程定性内容的方法。”这是什么意思？

费曼：在那一段我谈的是薛定谔*方程。现在你们可以从束缚在分子中的原子的薛定谔方程得到化学价——但是当你看着这方程的时候，你看不到任何化学家们所知道的丰富现象；或者这样的观念：夸克永远是受缚的，所以你不可能得到一个自由的夸克——也许你能得到，也许不能，但问题的关键是，当你看着这个被认为是描述夸克行为的方程时，你看不出夸克为什么应该这样。看着描述水中原子和分子力的这个薛定谔方程时，你看不出水的行为方式，你看不出紊

* Erwin Schrödinger，爱尔文·薛定谔（1887~1961），1933 年诺贝尔物理学奖得主（和 P·A·M·狄拉克分享），因为他发现了富有成效的原子理论新形式。——编者

乱现象。

Omni：这让人们陷入了关于紊乱的问题——气象学家、海洋学家、地质学家和飞机设计师都有那么一点陷于困境，是吗？

费曼：绝对是这样。也许就是某个处于这种困境的人，他被搞得如此沮丧，于是他想去解决这个问题，这时他要进行的是物理研究。对于紊乱，我们束手无策，我们根本就没有好的基础理论——物理理论只能处理简单的现象，不仅仅紊乱这一例。

Omni：也许这是教科书的写法，但是就理论而言，站在科学之外的人们很少能够明白，真正复杂的物理问题是多么容易让我们束手无策。

费曼：这是很不好的教育。在你成为物理领域里的长者之后，你得到的教训是，我们所能做的，只是其中很小的一个碎片。我们理论的力量真的十分有限。

Omni：物理学家看到一个方程的定性结果的能力相差很大吗？

费曼：噢，是的——但是没有人特别擅长于此。狄拉克说过，理解一个物理问题意味着能够不解方程而看到结果。也许他是夸张了，也许解方程是你达到理解所需要的经验但是在你真正理解之前，你只是在解方程。

Omni：作为一个教师，为了鼓励这种能力你能做些什么？

费曼：不知道。我无法判断学生理解我到什么程度。

Omni：已经有人研究了卢瑟福、玻尔、费米的学生，会不会某一天有个科学史家去追踪你学生的科学生涯？

费曼：我想不会。我一直为我的学生感到遗憾，我不是

一个知道自己在做什么的老师。

Omni：但是换一种说法，你可以描述你所受的影响，比如，汉斯贝蒂或琼·惠勒对你的影响……？

费曼：确实。但是我不知道我自己的影响。也许这只是我个人的特点：我不知道。我不是心理学家或社会学家，我不知道如何去理解一个人，包括我自己。你也许要问：这家伙怎么能教学？如果他不知道自己在干什么，他怎么可能有热情？但事实是，我热爱教学。在我解释事物的时候，我喜欢找出看待它们的新方法，以使它们更清楚——但是也许我不是在使它们更清楚，我可能是在自娱自乐。

我已经学会了如何在不知道中生活。我不必确信我在取得成功，正如我以前谈论科学时所说，我认为我的生命之所以更丰富了，是因为我认识到了我不知道自己在做什么。世界的广博令我欣喜。

Omni：我们回到办公室的时候，你停下来说到了一个你将要做的关于色觉的演讲。那离基础物理实在很远了，是不是？生理学家会不会说你“入侵”？

费曼：生理学？它（色觉）必须是生理学吗？看，给我一点时间，我能就生理学上的任何问题做一个演讲。我会很高兴去研究它，发现它的一切。我什么都不知道，但我确实知道，只要你进入得足够深，任何事情都有意思。

我儿子也是这样，尽管他的兴趣比我在他这个年龄时的兴趣要广泛得多。他爱好魔术，爱好计算机设计，对早期教堂的历史感兴趣，对拓扑学感兴趣——哦，他要受罪了，世上有这么多有趣的事情。我们喜欢坐下来，谈论事物可能与我们所希望的多么不同；比如，说到登陆火星的海盗登陆车，我们想思考火星上有多少种有生命的可能是他们用这个

设备发现不了的。是的，他很像我，所以至少我把“任何事情都有意思”这个思想传给了至少另外一个人。

当然，我不知道这是不是一件好事……明白吗？

10　货拜族科学：对科学的一些评论，伪科学以及学习如何不自欺

1974 年加利福尼亚理工学院
毕业典礼上的演讲

问题：巫医、超感觉知觉、南海岛民、犀牛角、威塞恩石油，这些东西和大学毕业典礼有什么关系？

回答：这些都是狡黠的费曼在说服离校学生时所用的例子，他告诉他们，科学中的诚实比社会上所有的荣誉和暂时的成功更有益处。在这个给加利福尼亚理工学院 1974 级毕业班的演讲中，费曼讲了在面对同行的压力和基金会的怒视时科学的诚实。

在中世纪，有各种各样疯狂的观念，比如一片犀牛角能够增强力量。（中世纪的另一个疯狂观念是我们现在戴在头上的这些帽子——在我看来，那太不严谨了。）后来人们发现了一个区分观念的方法——他们的做法是，拿一个来试试，看它是不是灵验，如果不灵，就把它删除掉。当然，这种方法逐渐就演进成了科学，它发展得很好，所以我们现在就到了科学时代。在这样一个科学的时代（我们受科学的浸染如此之深），以至我们很难理解：既然巫医的提议没有一个真正灵验——或很少灵验，他们那时为什么还能存在呢？

但是即使在今天，我还是遇到许多的人，他们或早或晚地拉我去谈飞碟，或者星相学，或者某种形式的神秘主义，膨胀了的意识，新型意识，超感觉知觉，等等。我从这里得出一个结论：这不是一个科学的世界。

大多数人都相信许许多多神奇的事情，于是我决定去研究一下为什么他们会这样。我那探索的好奇心把我推进了一个困境，我发现，在那里要谈论太多太多毫无意义的事，我不能在这个报告中说尽那些事情。我整个被那些东西覆没了。我首先是从调查神秘主义和神秘经验的各种观念着手的。我走进一个隔绝的箱子（箱子里黑暗而安静，而你漂浮在泻盐中），经验了长时间的幻觉，于是我对之有所了解了。然后我去了爱撒冷（Esalen），那是个这种（神秘主义）思想的温床（这是个极好的地方，你们应该去游览一下）。然后我就被那些事情覆没了，我搞不清楚那儿有多少这样的事情。

例如，我坐在一个很热的浴室里，浴室里还有另一家伙和一个女孩子。他对那个女孩子说，“我在学习按摩，可不

可以在你身上实践实践？”她说 OK。于是她起身坐到张桌子上，他从她的脚开始——按摩她的大踇趾头，推着它转。然后他转头向一个明显是他老师的人，说，“我感觉到一种凹痕，是垂体吗？”她说，“不，垂体的感觉不是这样的。”我说，“伙计，你离垂体远着呢。”他们一齐看着我——你知道，我已经不再掩饰了——她说，“这是反射论。”于是我闭上眼，装出沉思的样子。

这只是淹没我的那种事情中的一个例子。我也考察了超感官感觉和 PSI 现象。最近的一次狂热，是有一个叫尤芮·盖勒（Uri Geller）的人，人们说他用手指擦擦钥匙，就能把钥匙弯过来。我于是应他的邀请去他宾馆的房间，看他示范心灵阅读和弯钥匙。他没有成功地做任何心灵阅读；我想，没有人能够阅读我的心灵。然后我儿子拿出把钥匙，盖勒用手指擦钥匙，但没有任何效果。他又告诉我们，说在水下的效果好些。你可以想象，我们都站在浴室里，开着水龙头；钥匙淹在水下，他用手指擦钥匙。什么效果也没有！所以我也就无法研究那现象。

然后我就想，还有其他什么我们相信的事？（然后我想到巫医，要检验它实在太容易的，只要注意到它没有任何真正的效果就行了。）我找到了一些甚至有更多的人相信的事，比如说如何传授某种知识。我们有阅读教学法、数学教学法等等这些大研究所，但是如果你留心一下，你会发现，尽管我们一直在请这些人来改进方法，我们的阅读成绩还是在持续下降——或几乎没有上升。我们既然可以检验一个不灵验的巫医疗法，我们也应该审视一下，他们怎么知道他们的教育方法一定有效？另一个例子是如何对待罪犯。我们用用来对付罪犯的方法来减少犯罪量，但是在这方面，我

们显然没有取得什么进步——我们有许多理论，但没有任何进步。

然而据说这些事情是科学的。我们研究它们。我觉得，那些具有常识的普通百姓受到了这种伪科学的胁迫。一个教师，她对如何教自己的孩子阅读有一些很好的想法，但是受学校系统的强迫，她只得用其他一些方法教孩子阅读——或者，因为受学校系统的蒙蔽，她甚至于怀疑自己的方法并不一定是个好方法。或者，一些坏孩子的双亲，他们曾用这种或那种方法惩戒他们的孩子，他们在余生里总有犯罪感，因为照专家们说，他们没有做“正确的事”。

所以我们确实应该检查检查那些不灵的理论，那些不是科学的科学。

我想找到一个（判断）原则，以便发现更多的这类事情，最后我得到了下面这个系统。不管什么时候，如果你正在鸡尾酒晚会上和一些人交谈，女主人走上前来说，“你们这些家伙为什么谈起商店？”或者你太太走上前来说，“你怎么又浮想联翩了？”如果你对这样的反应并不感到不舒服——那么你可以肯定，你是在谈论一件没有人知道是怎么回事的事。

用这个方法，我又发现了几个已经为我遗忘了的话题——这其中有各种不同形式的心理疗法的效力。于是我开始利用图书馆对这些问题进行研究……我有太多的内容要报告给你们，不能在这儿尽说，所以只好把我要说的限制在几件小事上。我要集中说说相信的人比较多的几件事。也许下一年我会发表一系列演讲来讨论所有的这些主题。这需要很长的时间。

我认为，我所提及的教育和心理学研究，属于我所谓货

拜族科学的例子。在南海生活着一个货拜族 *。二战期间，他们看到飞机着陆并带来了大量好东西，现在他们希望那样的事情再次出现。于是他们筹划做一个像跑道一样的东西，并在跑道两旁生上火，又做一个小木屋，让一个人坐在里面，头上戴着两块像是耳机收话器的木片，还有竹竿像天线一样伸出——他是控制员——然后他们等待一个飞机来着陆。他们正确地做每一件事，他们做的东西形式上完美正确，和他们以前看到的一模一样。但是它不灵，没有飞机来着陆。我把这些东西叫做草包族科学，因为他们遵循科学研究的所有外在规则和形式，但是他们遗漏了内在的东西，因为飞机没有着陆。

当然，我应该告诉你们他们遗漏了什么。但是这很困难，就像要向南海岛民解释他们必须怎么安排事情才能从他们的系统中得到财富一样困难。这不是一件像告诉他们怎么改进耳机形状那样简单的事。但是我注意到，有一个因素是货拜族科学中普遍缺乏的。这是一种理念，一种我们总希望你们在学校学习科学的过程中已经学到了的理念——我们从未明确地说它是什么，而只是希望你们通过科学研究的例子把握住它。所以我现在把它拿出来并明确地说起它，这是很有意思的。这是一种科学的正直，是科学思考的一个原则，一种绝对的诚实。举例来说，如果你在做一个实验，你应该报告所有你认为可能导致它无效的数据或现象——而不仅仅汇报你认为对它有利的：其他那些可能解释你结果的根据；那些你记得已经通过其他实验而被你排除了的东西，及这些东西是怎么起作用的——要确信其他人能够证明它们已经被

* 南太平洋岛上的一些土著有一种货物崇拜的迷信，认为祖先或神会带着大量西方现代货物重返当地。——译者

排除了。

对于可能导致对你的解释产生怀疑的细节，如果你知道，就一定要报告出来。如果你知道某事整个就是错的，或可能是错的，你一定尽你所能去解释它。比如说你搞了一个理论，你要宣传它，或者公开它，那么你必须也要记下所有与之不相符的事实，就像你记下那些与之相符的事实那样。这儿还有一个更微妙的问题，即如果你已经把许多思想放在一起创造一个精细的理论，当你解释它的适用范围时，你总想证明，它所适用的那些事，并不就是给了你这个理论所需的思想的那些事，而是完成了的理论又直接导出了另外一些东西。

概括地说，这个理念（诚实）要求你给出所有的信息，以帮助其他人判断你的贡献的价值之所在；而不只是给出那些把人导向某个特殊方向的信息。

要说明这个理念，最容易的办法是把它和广告进行对比。昨晚我听一个广告，说威森食物油不会浸入食物。那是真实情况，不能说它不诚实。但是我现在谈论的不是“不诚实”的问题，而是“科学的正直”这个问题，这是另一个层次的问题。在科学的层面上，那个广告应该加上一点内容：事实是，在某个温度下，任何油都不会浸入食物；但是在另一个温度下，所有油都会浸入食物——威森食物油也不例外。所以你看，这里传达的是含义，而不是事实，事实是没有问题的。我们一定要注意其间的区别。

我们知道：经验证明，真相总有水落石出的一天。其他的实验者会重复你的实验，证实你是对还是错；自然界的现象也会认同或者不认同你的理论。而且，即使你可能获得一点暂时的名望并感到一时的兴奋，但是如果你没有打算以十

分谨慎的态度投入这种工作，你就不可能获得一个科学家的声誉。这种正直，这种不自欺的愿望，恰恰就是货拜族科学的许多研究所特别缺乏的。

当然，他们的大量困难是研究主题本身的困难，科学方法不适用于这个主题。然而需要指出的是，这不是唯一的困难。这就是飞机为什么没有来的原因——它们没有来。

我们已经从经验中得到了许多教训，知道如何对付我们自欺的某些方法。举一个例子：密立根（Milliken）曾用油滴实验测量电子电量并得到了一个结果，这个结果在我们看来，不是很正确的。因为他错估了空气的粘滞性，所以他得到的结果有那么点点出格。回顾一下密立根之后电子电量的测量史是很有意思的。如果你绘制一个关于它们的时间函数，你会发现，这一个的结果比密立根的大一点，下一个比这一个大一点，下一个又大一点，直到最终在一个比较高的数值上稳定下来。

为什么他们没有立即发现新数值比较高？这是今天科学家们感到羞愧的一段历史——因为那时人们显然是这么做事情的：如果他们得到一个数值远高于密立根的数值，他们就觉得肯定是哪儿出错了——于是他们就会去寻找自己的错误，并且找出一个为什么某个地方可能错了的理由。而如果他们得到一个数值与密立根的估计比较接近，他们就不会感到不安。于是他们就删除掉那些差距比较大的数值。其他事情上面也是这样。我们今天已经知道了那些骗局，不会再有那种毛病了。

但是很遗憾，就我所知，这段学会如何不自欺——获得绝对的科学的正直——的漫长历史，我们至今还没有一门专的课程来容纳它。我们只是希望你们已经于潜移默化中领

会了它。

第一个原则，千万不要自欺——而你们是最容易自欺的人，所以你们一定要十分警惕。能够不自欺，自然也就不会欺骗其他科学家，从此之后你就不知不觉地习惯于诚实了。

我还要补充一点，它对科学家们虽然并非至关重要，但是我对之却有几分信仰——这就是，在你作为一个科学家讲话时，不要欺骗外行人。我这儿不是叫你们不要骗你们太太或女朋友，或其他这类的事，在你们不是以科学家身份出现，而是作为普通人出现时，那是另一回事——这些问题就留给你和你们的法学专家去讨论吧。我现在是在谈一种特殊的、额外要求的正直：不说谎，而是尽量表明为什么你可能不对，这才是你作为一个科学家应该做的。这是我们作为科学家的责任，对其他科学家自然应该这样，而对外行，我想也应该这样。

举个例子。有一次我和一个朋友聊天，他打算去研究无线电通讯，这让我有点吃惊。他是研究宇宙学和天文学的，但是他很迷惑，不知道该怎么解释他的工作有什么实用价值。“噢，”我说，“没什么实用价值。”他说，“是的。但是这样的话，我们就拿不到经费进行更多的研究。”我觉得这也是一种不诚实。如果你声称自己是个科学家，你就应该向外行人解释你在做的是些什么事情——这种情况下，如果他们不资助你，那是他们的决定。

这一原则的一个例子是：如果你下定决心要去验证一个理论，或者你想说明一个观点，任何情况下，你都应该让人们知道它是怎么出来的。如果我们只公布某一种结果，我们的论证看起来可能会好一些，但我们必须公布两种结果。比如说——我们再以广告为例——假设某些特殊的香烟有一些

特殊的性质，比如低尼古丁。烟草公司于是大力宣传，说这意味着这种香烟对你有好处——他们不说，比如，焦油的含量不同，或者香烟还有其他的害处。换句话说，他是根据答案的要求选择发布的内容。我们不应该这么做。

我还要说，在某些类型的政府咨询中，这种诚实的态度也很重要。假设有一个议员就是否该在他们州钻探石油向你咨询，而照你的判断，在其他州钻探更好一些。如果你不发表你自己得出的结论，那么在我看来，你就不是在给出一个科学的建议。你是在被别人利用。如果你的答案正好是政府或政治家们所喜欢的，他们就把它作为他们所喜好的一个证据；而如果你的答案走的是另一个方向，他们根本就不会把它公布出来。这不是在进行科学的咨询。

一些其他种类的错误，更是糟糕科学所具有的特有特征。我在康奈尔的时候，经常找心理学系的人谈话。有一个学生告诉我说她想做这么一个实验——我记不清它的细节了——大致是说，已经有人发现，在某种特定环境下，X老鼠做某种事，A。她想知道，如果她把环境换成Y，它们是否仍然做A？因此她的目标是在环境下做实验，看看它们是否仍然做A。

我向她解释，第一步，必须在她的实验室里重复其他人已做的实验——首先要在X条件下做实验，看看她是否也能得到结果A——然后再换到Y，看是否变化了。然后她就会明白，真正的问题在她认为她已经掌握了的东西上面。

这个新的想法让她很高兴，她兴冲冲地去找她的导师。然而导师的回答是，不，你不要那样做，因为其他人已经做过那实验了，你再做只是浪费时间。这大概是在1935年，或前后，那时好像已经形成了一个普遍的原则，不要重复做

心理学实验，而只改变条件，看发生什么。

今天，发生同样事情的危险仍然存在，甚至在著名的物理学领域，也会发生这样的事情。得知在国家加速器实验室的大加速器上所做的一个实验，我惊呆了。有个人在那里用氘做实验，为了把他的重氢实验结果与用轻氢做实验可能得到的结果进行比较，他不得不借用其他人用轻氢做实验所得的数据，而那些轻氢实验是在另外的设备上做的。问他为什么，他说因为在这个项目上（因为时间这么少，这设备又这么昂贵）他不可能获得用设备进行轻氢实验的时间，因为这不可能有任何新成果。在国家加速器实验室管理这个项目的人是那么渴望新成果，因为他们要靠新成果争取更多的钱来维持这个项目。为了公关，他们也许正在毁掉实验本身的价值这件事的最终目的。那儿的实验员通常很难按照科学的诚实要求去完成他们的工作。

然而也不是所有的心理学实验都是这种类型。比如，我们已经做过许多实验，让老鼠穿过各种各样的迷宫等等——然而很少有明确的结果。但是在 1937 年，有个名字叫“杨”的人做了一个很有趣的实验。他弄了个长长的走廊，走廊的一侧有许多门，老鼠从这里进来；走廊的另一侧也有许多门，放着食物。他想看看他能不能训练老鼠，不管从哪儿放它们出来，它们都走进从放它们出来的门数起的第三个门。不。老鼠径直走向上次放食物的那个门。

问题是，老鼠怎么会知道这就是以前的那个门？因为走廊修得那么漂亮、那么均衡！显然这个门有不同于其他门的地方。于是他把所有的门十分仔细地漆了一遍，使门面上的纹理完全一样。但是老鼠还是能够分辨。然后他想，也许老鼠是闻食物的气味。于是他每次实验时都用化学药品改变气

味。但是老鼠还是能够分辨。然后他意识到，也许老鼠能够像普通人一样，通过看实验室里的灯光和布置来判断。于是他把走廊蒙起来，然而老鼠还是能够分辨。

最后他发现，老鼠是依据它们跑过去时地板发出的声音来判断的。只要把他的走廊放在沙地里，一切就搞定了。他把所有可能的线索一个一个掩盖掉，最后终于能够欺骗老鼠，让它们不得不学习走进第三个门。如果他把条件放松任何一点点，老鼠就能分辨。

从一个科学的立场来看，这是个甲等一号实验。就是这个实验，使得跑老鼠实验有了点实际的内容，因为它揭示了老鼠实际使用的线索，而不是你认为老鼠使用的线索。也就是这个实验，它准确地告诉你，为了在一个跑老鼠实验中能够留心并掌控每一件事，你必须运用哪些条件。

我调查了这个实验的后续历史。下一个实验，再下一个实验，从没有提到杨先生的。他们从不使用他的标准——把走廊放在沙地上，或者十分仔细，十分小心。他们只是用老方法跑老鼠，根本不关心杨先生的重大发现；他的论文也没人提及，因为他没有任何关于老鼠的新发现。而事实上，他发现了在老鼠研究中你必须做的所有事情。但是，不关注这样的实验，正是货拜族科学的特点。

另一个例子，是莱恩先生（Mr. Rhine）和其他人的 ESP（超感觉知觉）实验。正如各方面的人所批评的那样——他们对自己的实验也有自我批评——他们改进技术，而结果却越来越小，越来越小，直至逐渐消失。所以研究超自然现象的心理学家都在寻找可重复的实验——你可以一遍遍重复，得到相同的结果——甚至是统计意义上可重复的实验。他们跑了百万只老鼠——不，这次是人了——他们做了大量的实

验，而且也得到了某个统计结果。下一次他们又尝试那实验，却再也得不到那结果了。现在你发现有一个人在说，“期望一个可重复的实验，这是不切题的要求。”这是科学？

这个人还说到一种新直觉，那是他在辞去心理学会主任的谈话中讲的。在告诉人们下一步该做什么时，他说他们必须保证只训练那些已经显示出有能力获得可接受的ESP结果的学生——不要在那些有抱负、有兴趣，然而只是靠运气取得结果的学生身上浪费时间。在教学中执行这样的政策，这是很危险的——只教给学生如何取得确定的结果，而不是教给他们如何用科学的诚实态度去做实验。

所以我希望你们——时间不多了，我对你们只提一点希望——希望你们好运，能去一个可以自由地保持我所说的这种诚实的地方，去一个不必为了维持你的位置，不必为了维持研究基金而被迫放弃你的诚实的地方。但愿你们拥有那自由。请允许我也再给你们一点最后的忠告：千万不要说你要发表一个演讲，除非你对所要讲的主题有清楚的了解，或者你或多或少知道你要说些什么。

11　和 1，2，3 一样简单

关于费曼的一个滑稽故事，这个早慧的学生用他自己，他的袜子，他的打字机和他的同学做实验，试图解开计数的秘密和时间的秘密。

我小时候是在法洛克威[*]长大的，在那儿我有个朋友叫伯尼·沃克。我们俩在家里都有一个“实验室”，可以做各种“实验”。有一次，我们讨论某件事——那时我们肯定已经有了 11 岁，或 12 岁——我说，“思考不过是在心里和自己说话。”

“哦，是吗？”伯尼说。“你知道汽车内部机轴的奇怪形状吗？”

“啊，什么样子？”

“好。现在你告诉我：你在和自己说话时，是怎么描述它的？”

因此，我从伯尼那儿得知，思考可以是说话，也可以是画面。

后来在大学里，我对梦发生了兴趣。我很奇怪，眼睛闭着的时候，事物怎么看起来那么真实，就像有光线撞击视网膜一样？难道视网膜的神经细胞确实受到了另一种形式的刺激——也许来自大脑本身的刺激——或者，大脑有一个“判断部”，在梦间流溢出来了？虽然我对大脑如何工作很感兴趣，但是对这样的问题，我从未能够从心理学中得到满意的答案。相反，到处都是关于解梦的研究等等。

我在普林斯顿研究院的时候，有一篇让人难以置信的心理学论文，引起了许多争论。作者论断说，大脑中控制“时间感”的东西，是一个与铁有关的化学反应。我暗自忖度，“那么，他是怎么知道的呢？”

原来事情是这样的：他太太有一次持续发烧，体温上上下下差别较大。他灵感一动，想测试测试她对时间的感觉。

* Far Rockaway，纽约皇后区的一个小镇。——译者

他让她自己在心里数秒（不看钟），检查她数到 60 需要多长时间。他让她——可怜的女人——整天数秒：他发现，当她体温升上去时，她数得比较快；体温降下来时，她数得比较慢。因此他想，大脑里管理“时间感”的那个东西在她发烧时一定比她不发烧时运转得快。

作为一个很“科学”的人，这个心理学家知道，化学反应的速度是随周围温度的变化而变化的，我们有一个建立在反应能基础上的确定的公式。他测量他太太数秒速度的变化，以确定体温使她数秒的速度变化了多少。然后，他就想找到一种化学反应，其反应速度随温度的变化在量上恰好和他太太的数秒的情况相当。他发现铁的反应与此符合得最好。于是他推断，她太太的时间感是由她体内一种涉及铁的化学反应控制的。

在我看来，这整个就是胡扯——在他一长串的推理中，可能发生问题的地方太多了。但是他提出了一个有趣的问题：“时间感”是由什么决定的？在你准备以某个速度数数时，这速度依赖于什么？为了改变数数的速度，你能对自己做些什么？

我决定去研究这个问题。我从数秒开始——当然不看钟——以一个缓慢、稳定的节奏一直数到 60：1，2，3，4，5……数到 60 时，只用了 48 秒。但这没有关系：问题的实质不是要精确地数一分钟，而是要用一定标准的速度数。接下来的一次，数到 60 用了 49 秒。再下一次，48 秒。然后是 47，48，49，48，49……结果我发现，我可以在一个相当标准的速度上数数。

现在，假如我只是坐在这儿，不数数，等到我觉得过去了一分钟，这样得到的结果就很不规则了——完全不同。于

是我发现，纯粹靠猜测来估计一分钟是很不准的。但是通过数数，我能够很准确。

现在我已经知道我能够以一个标准的速度数数，接下来的一个问题是——是什么影响数数的速度？

也许和心率有关系。于是我开始上上下下爬楼梯，上来下去，让我的心跳变快。然后我跑回房间，往床上一躺，数到 60。

我还想一边爬楼梯一边在心里数数，在爬的过程中数。

另一个家伙看见我爬上爬下，大笑道：“干什么呀？”

我无法回答——这让我意识到，我不能一边在心里数数，一边和别人说话——我不能开口答他的话，只是继续在楼梯上跑上跑下，像个傻瓜。

（研究院的伙伴对我的疯疯癫癫已经习以为常了。比如另有一次，有个家伙走进我房间——“实验”过程中我忘了锁门——看见我穿着我那厚厚的羊皮外套坐在椅子里，在奇冷的冬天，探身于敞开的窗外，一手拿着个罐，一手在搅拌。“不要打扰我！不要打扰我！”我说。我在搅吉露果冻并仔细观察：我一直很好奇，如果你保持吉露果冻一直在动，它还会不会凝结？）

总之，尝试了上下跑楼梯和躺在床上的各种组合后，奇怪，心跳快慢对结果没有影响。而且既然我已经上下楼梯跑得浑身都发热了，所以我得出结论：体温与“时间感”没有什么关系（尽管我应该知道，在运动的时候，体温其实并不真的升高）。实际上，我不可能发现什么影响我数数速度的事情。

上上下下跑楼梯太烦人了，于是我在做一些不得不做的事情时数数。比如去洗衣房，我不得不填单子，说我有多少

衬衣，多少裤子等等。我发现我能够在“裤子”前面写上“3”，或在“衬衣”前面写上“4”，但是我数不清我的袜子。袜子太多了：我已经用上了我的“计数机器”——36，37，38——所有这些袜子摆在我面前——39，40，41……我怎么来数这么多袜子？

我发现我可以排成几何图案——比如排成一个长方形：这个角上一双袜子，另一个角上一双袜子；这儿一双，那儿一双——八双袜子。

我继续进行这种用图案数数的游戏，发现可以用它来数报纸上文章的行数。把行数组成 3，3，3，1 图案，就得到 10；然后 3 个这种图案，3 个这种图案，3 个这种图案，1 个这种图案就成了 100。我就这样把报纸浏览下去。在我数到 60 之后，我知道我在图案的什么位置，我会说，“我数到 60 了，是 113 行。”我发现，我甚至能够一边读报纸，一边数到 60，根本不影响我数数的速度！实际上，我可以一边在心里数数，一边做其他事情——可以做任何事情，当然，除了大声谈话。

打字呢——从一本书上复制文字？我发现我也可以做，不过这时我的时间受到了影响。这让我很兴奋：我终于发现一件可以影响我数数速度的事情！我又对此做了些研究。

我用相当快的速度打着简单的字，一边在心里数数，19，20，21，继续打，继续数，27，28，29，继续打，直到——这究竟是什么字？哦，是的——然后接着数，30，31，32，等等。数到 60 的时候，一看，慢了。

作了一些反省和进一步的观察之后，我认识到情况一定是这样的：在我遇到一个难字，所谓“需要更多脑筋”的字时，我数数被打断了。我数数的速度其实并没有慢下来，而

是数数这个活动本身时不时被暂时阻挡了。数到 60 已经成为那么自动化的一个活动，以至我开始的时候甚至没有注意到“被打断”。

第二天，早餐结束后，我在桌上向其他人汇报了所有这些实验的结果。我告诉他们我在心里数数时所能做的那些事情，并且说我数数时唯一一件绝对做不了的事情是说话。

其中一个家伙，一个名叫琼·托凯的伙伴说，“我不相信（你数数的时候）能阅读，我也不明白你（数数时）为什么不能说话。我打赌，我可以一边在心里数数，一边说话；我还愿意赌你不可能边数数边阅读。”

于是我就做给他们看：他们给我一本书，我读了一会儿，一边心里数着数。当我数到 60 时，我说“好”——48 秒，我的习惯时间。然后我告诉他们所读的内容。

托凯迷糊了。后来我们测试了他几次，看看他的习惯时间是多少。他开始说话：“玛丽有一只小羔羊；我想说什么就能说什么，不会有什么不同；我不知道你烦心什么”——吧嗒，吧嗒，吧嗒，最后，“好！”正好到他的习惯时间！我难以置信！

我们讨论了一会儿这个事情，有了一点发现。原来托凯是用另一种方法数数的：他在看一个上面带数字的磁带的移动。他说“玛丽有一只羔羊”时观察着这个磁带。好，现在清楚了：他“看”着他的磁带移动，所以他不能阅读；而我数数时是和自己“交谈”，所以我不能说话！

这个发现之后，我想找到一种一边数数一边大声朗读的方法——这是我们两个人都做不到的。我想到，我必须要用大脑的一个特定部分，这部分与看或说的部分没有干扰。于是我决定用我的手指，因为它只涉及触觉。

不久，我就能成功地用手指数数，同时大声朗读了。但是我希望这整个过程是精神的，不依赖任何身体的行为。于是我试着在大声朗读时，想象我手指移动的感觉。

我一直没有成功。我想这是因为我训练不够，但是也许这根本就不可能：我从未遇见谁能做到这一点。

通过这个经验，托凯和我发现，当人们认为他们做着同样的事情时——像数数一样简单的一些事情——他们脑子里的活动其实是各不相同的，随人而异。我们还发现，我们可以从外面客观地检验大脑如何工作：你不必问一个人他怎么数数，这依赖于他自己对自己的观察；你只需看他在数数时能做什么，不能做什么。这个检验绝对有效，不会失败，不会受骗。

人们总是用他头脑中已有的东西去解释一个观念，这是很自然的。概念是相互垒起来的：这个观念用那个观念来教，那个观念又用另一个观念来教，这是从数数来的，而不同人的数数方法又是那么不一样！

我经常思考这个问题，特别是在我讲授某些深奥的技术，比如求贝塞耳方程的积分的时候。当我看到方程时，我看见的是有颜色的字母——不知道为什么。在我说话时，我看见扬克（Jahnke）和爱默德（Emde）书中贝塞耳方程的模糊图画，褐色的 js,，轻紫蓝色的 ns，棕黑色的 xs，在四周飞舞。我很疑惑，在学生们眼里它究竟像什么？

12　理查德·费曼　建构一个宇宙

美国科学促进会以前主办过一次对费曼的访谈，在这个未发表的访谈中，费曼回忆了他的科学生涯；他第一次在坐满了诺贝尔奖得主的房间里演讲；受邀研制第一颗原子弹和他的反应；货拜族科学；那个黎明前吵醒他的要命的电话——一个记者告诉他他赢得了诺贝尔奖。费曼的回答是：“你应该等到早上再告诉我。”

解说：

麦尔·费曼是纽约一家制服公司的销售员，1918 年 5 月 11 日，他迎来了他的儿子理查德的诞生。47 年后，理查德·费曼获得诺贝尔物理学奖。如理查德·费曼所述，在许多方面麦尔·费曼都与这个成功有很深关系。

费曼：

在我出生之前，他（我父亲）对我母亲说“这个男孩将来会成为一个科学家。”今天我们正面临着妇女解放，你当然不能说这样的话，但那时他们确实是这么说的。不过他从来没有要求我成为一个科学家……我学习欣赏我所知道的东西。从来没有什么压力……我稍大之后，他带我去树林里散步，给我讲动物和鸟等等……告诉我星星、原子以及各种其他事情。他会告诉我它们怎么样怎么样，那很有趣。他有一套对待自然的态度和观察它的方法，我发现，对一个没有受过直接的科学训练的人来说，他的态度和方法是很科学的。

解说：

理查德·费曼现在是加利福尼亚技术研究院的物理教授，他从 1950 年开始就到那儿了。他的时间，一部分用于教学，另一部分贡献于对构成我们这个宇宙的微物质的理论研究。在他的整个研究生涯中，他偶然的诗一般的想象，把他带入了许多其他奇怪的领域：造原子弹所涉及的数学；简单病毒的遗传学；超低温状态下氦的性质。他赢得诺贝尔奖的工作——发展了量子电动力学，使之能够比以往更直接、更有效地解决许多物理问题。然而，启动这一长串成就的，同样

是父亲和他在树林里的漫长散步。

费曼：

他有观察事物的方法。他习惯于说，“假设我们是火星人，我们降临到地球，然后我们会看到这些在做事情的陌生生物；我们会怎么想？”他说，“比如，举个例子来说，假设我们从不睡觉——我们是火星人——但是我们有全天候清醒着的意识，我们发现这些生物每天有八个小时要停下来并闭上眼睛，这期间他们或多或少变得迟钝了。我们有个有趣的问题要问他们，我们会说，‘这整个过程中感觉如何？你们的思想发生了什么事？你们运行得很好，你们思考清晰——那么发生了什么事？它们是突然停下来的吗？或者是越来越慢最后停了下来？或者准确地说，你们怎么就停止了思考？’”后来我对这个问题进行了许多思考，在大学里还做了实验，想找出答案——在睡觉时，你的思维究竟怎么了？

解说：

一开始，费曼博士是想做一个电机工程师，他涉足物理学，是想用它为自己和自己身边的世界服务。但是没有多久，他就认识到自己其实对事物背后的原理更感兴趣，那些使事物如此运作的原理，那潜伏在宇宙运行背后的理论和数学原则。他的心灵变成了他的实验室。

费曼：

年轻的时候，我所谓的实验室只是一个供我瞎鼓弄的地方，做收音机、小配件、光电池等等小玩意。当我在一所大学里看到一个他们所谓的实验室时，我很震惊。在那里他们

要求你严肃地测量某些东西。在我的实验室里，我从不测量什么，只是到处鼓弄，造东西。这是我年轻时的一种实验室，我就是这么想的。我想这就是我要走的路。在那个实验室里，我不得不解决特定的问题。我常常修收音机。比如说，我得把电阻和一些伏特表连在一起，以改变读数，像这一类的事情。于是我开始去找这些公式，电学公式。我的一个朋友有一本书，上面有电学公式，有变阻器关系的公式。书上有这些东西，比如能量是电流的平方乘上电压；电压除以电流就是电阻，等等，共有六七个公式。这些公式似乎相互关联，它们确实都不是独立的，这一个可以从另一个推出来。于是我就去琢磨它，我从学校学习的代数去理解如何推导它们。我认识到数学在这里面相当重要。

所以我就对与物理有关的数学越来越有兴趣。补充一下，数学本身对我也有很大吸引力。我一生都喜爱数学。[……]

解说：

从麻省理工学院毕业之后，理查德费曼转到西南大约 400 英里的普林斯顿大学，在那里他最终获得了他的博士学位。也正是在那里，他做了他的第一次正式报告，那年他 24 岁。事实证明，那是一个十分重要的报告。

费曼：

在大学的时候，我做惠勒 * 教授的研究助手，我们一起搞出了一个新理论，是关于光如何起作用，以及不同地方的

* John Archibald Wheeler，琼・阿奇博尔德・惠勒（1911~），物理学家，因为造了“黑洞”这个词而广为大众所知。——编者

原子之间的相互作用如何发生的。这在当时显然是个很有意思的理论。于是魏格纳 *教授——他在普林斯顿主持讨论会——建议我们做一个这方面的报告。惠勒教授说既然我是个年轻人，而且没有做过报告，这将是个学习如何做报告的好机会。所以这是我所做的第一个学术报告。

我开始为之做准备。魏格纳过来对我说，他认为这个工作很重要，所以他特别邀请了一些人来参见这个报告会，有泡利教授，从苏黎世来访问的著名物理学教授；冯·诺伊曼教授，世界上最著名的数学家；亨利·诺里斯·罗素，著名天文学家；还有阿尔伯特·爱因斯坦，他当时住在附近。我当时一定是脸色苍白了，因为他对我说，“不要紧张，不用担心。首先，如果罗素教授睡着了，不要沮丧，因为他总是在讨论会上睡着。如果你讲的过程中，泡利教授点头，也不要得意，因为他总是点头，他中风了。”等等。这让我稍微镇定了下来一些，但我还是担心。最后惠勒教授向我保证，由他回答所有问题，我只需做报告。

我记得，我走进会场——你可以想象那第一次——就像钻火圈。我已经提前把所有方程都写在黑板上了，满黑板的方程。人们不需要这么多的方程……他们只想比较好地理解你的思想。我记得我走上去讲，这些伟大的人就坐在听众中，真是可怕。我仿佛还能看见我自己从文件袋中拿出稿纸时那双颤抖的手。但是一旦我拿出稿纸开始报告，另一种现象出现了——从那以后，这种现象总是会出现，这是个很美妙的现象。一旦我谈起物理——我热爱它——我想也只有谈起物理时，我就不再担心我是在什么地方，我就什么也不担

* Eugene P. Wigner，尤金·魏格纳（1902~1995），1963 年被授予诺贝尔物理学奖，以表彰他的对称原则工作对原子核和基本粒子理论的贡献。——编者

心。一切进行得很顺利。我只是尽我所能地解释我们所做的工作。我不考虑有谁在那儿，我只考虑我要解释的问题。然后，到了提问的时间，我也没什么可担心的，因为有惠勒教授来回答他们。泡利教授站起来——他坐在爱因斯坦旁边。他说，“我认为这个理论不对，因为这个和这个，那个和那个，还有其他的，等等。难道你不同意吗，爱因斯坦教授？”爱因斯坦说，“不……，……，……，”这是我所听过的最优美的“不”。

解说：

在普林斯顿，理查德·费曼明白了一件事：即使他完全生活在数学和理论物理的世界中，在这之外仍然有个世界坚持向他提出很实际的要求。那个年代，世界正处于战争之中，而美国也刚开始了研制原子弹工作。

费曼：

正是那个时候，鲍勃·威尔逊来到我房间告诉我他开始的一个项目，这个项目与为原子弹而准备的铀分离有关。他说 3:00 有个会议，这是个秘密，但是他知道，一旦我知道这是个什么秘密之后就不得不支持它了，所以告诉我也不会有什么危险。我说，“你错了。你不该告诉我这个秘密，我不会支持你。我要回去做我自己的工作——回到我的论文专题研究。”他走出房间，留下一句话，“我们将在 3:00 开个会。”这是早上的事。我开始踱步，思考：如果这炸弹在德国手中会带来什么后果？我思考所有这些事，认定做这个事情很重要，也很让人兴奋。所以我就参加了 3:00 的会议，同时也停止了学位论文方面的工作。

问题是，为了造炸弹，你必须要分离铀同位素。铀有两种同位素，其中 ^{235}U 比较活跃，你得分离它们。威尔逊已经发明了一种分离方案——产生一束离子并把离子捆成束——在同样的能量下，这两种同位素的速度有轻微的不同。因此，如果你把它们做成小块，让它们通过一个长试管，其中一个会跑在另一个前头，这样你就可以把它们分离开来了。这是他的计划。我那时做理论研究。我最初分配到的工作，是论证那样设计的方案是不是完全可行，究竟能不能做到？还有关于空间电荷制约的许多问题等等，我推断那可以做到。

解说：

尽管费曼推断威尔逊分离铀同位素的方法在理论上确实是可行的，但是最终还是采用了另一种生产 ^{235}U 的方法。虽然如此，新墨西哥州负责发展原子弹的洛斯-阿拉莫斯主实验室里，仍然有许多工作需要费曼和他的高水准理论化能力去完成。战后，他加入了康奈尔大学的核研究实验室。如今他对他所做的使原子弹成为可能的工作有一种复杂的情感：他是做了正确的事，还是做了错误的事？

费曼：

不，我不认为我那时的决定是个错误。我思考了原子弹的问题，我确实认为如果纳粹得到了它将非常危险。不过我认为，在德国被打败后，我对原子弹的思考有个错误——那是很晚了，大概在德国失败三或四年之后，我们仍然十分努力地工作。我没有停下来；我甚至没有考虑做这件事的最初动机已经不复存在了。那是我得到的一个教训，就是，如果

你有某些理由去做某件事，你的理由很充分，于是你开始去做；但是你一定要不时环顾一下，看看最初的动机是否还正确。在我做出那个决定的时候，我认为它是正确的；但是继续做那工作而没有思考，这可能就错了。也许我决定了无论如何要继续做下去，我不知道。但是，促使我做出最初决定的那个最初条件已经变化了，而我没有去思考它，这是个错误。

解说：

在康奈尔度过了富有刺激的五年之后，像他之前和之后的其他许多东方人一样，费曼博士被吸引到了加利福尼亚，和具有同样刺激性环境的加利福尼亚理工学院。当然，这里面还有其他原因。

费曼：

首先，伊萨卡的气候不好。第二，我有点喜欢走出去，去夜总会之类的地方。

鲍勃·巴赫邀请我到这儿来，就我在康奈尔展开的某些工作做一系列报告。于是我就做了报告，然后他说，“我借给你我的汽车吧？”我对他的热心很满意，就拿了他的车。每天晚上我都去好莱坞和落日带逛，玩得很高兴。这里舒适的气候和宽阔的视野是纽约州北部的一个小镇不可能有的。这两个因素，最终让我来到了这里。这不是很难的事，我的选择也没有错。又一个没有错的决定。

解说：

在加利福尼亚理工学院，费曼博士担任理论物理的理查

德·查斯·托尔曼教授*，1954年，他获得了阿尔伯特·爱因斯坦奖；1962年，原子能协会授予他E. O. 劳伦斯奖，因为“他在原子能的发展、使用和控制上的特殊贡献。”最后，1965年，他获得了最伟大的科学奖，诺贝尔奖。他和日本的朝永振一郎、哈佛的朱莉娅·施温格分享了这个奖。对费曼博士来说，这个诺贝尔奖意味着半夜里的一个鲁莽的惊扰。

费曼：

电话响了，那家伙说（他是）一个广播公司的。我很恼火被吵醒了，这是我的自然反应。你知道，你半夜醒了，你被惹恼了。那家伙说，“我们很高兴告诉您，您赢得了诺贝尔奖。”我自己想——你知道，我还在恼火——当时没有记下来。于是我说，“你应该等到早上再告诉我。”于是他说，“我以为您愿意知道。”然后，我说我在睡觉，就把电话挂了。我太太说，“什么事？”我说，“我得了诺贝尔奖。”她说，“睡吧，别逗我。”我常常想戏弄她，但是我从未能够戏弄她。每次我想戏弄她，她都看穿我，但这次她错了。她以为我在开玩笑。她以为是某个学生，某个喝多了的学生，或其他之类的。所以她不相信我。但是十分钟之后，另一家报纸的电话来了，我对那个家伙说，“是，我已经听说了。别再烦我。”然后我就把电话摘了，我想我该回去睡觉，到再把电话接上。可是我睡不着了，我太太也睡不着。我起来，在房间里走来走去，最后我又把听筒放回去，开始接电话。

* 指以 Richard Chace Tolman 名字命名的教授职位。——译者

这之后不久，我在某个地方坐出租车，出租车司机在说这件事，我也在说这件事，我就把我遇到的问题告诉他，那帮家伙如何问我，我又不知道怎么解释等等。他说，“我听过你的一个访谈。我是在电视上看的。那家伙问你，‘请您用两分钟解释一下，您做了什么而拿到这个奖？’你真的想给他们解释，真是疯了。你知道我会怎么说？‘嗨，老兄，如果我能够在两分钟内解释给你听，我就不值这个诺贝尔奖了。’”从那以后，我就用这种方法回答。如果有人问我，我总是告诉他们，看，要是我能够那么容易地解释它，它就不值得拿诺贝尔奖了。这不是真正公平的一个回答，却是一种有趣的回答。

解说：

前面已经提到，费曼博士获得诺贝尔奖，是因为他在发展一个理论方面的贡献，这个理论能详细说明量子电动力学这个新出现的领域。就像费曼对它的评价，这是“所有其他事物的理论”。它确实不适用于核能或重力，但是它确实适用于电子和光子间的相互作用。它支撑着电流的流动方式，磁现象，X 射线的产生途径以及与其他物质形式的相互作用。量子电动力学中的“量子”认可了 20 世纪中期的一个理论，这个理论宣称，环绕着每个原子核的电子，被限制在确定的量子状态或能级上。它们只能存在于那些能级，而不可能处于两个能级之间。另外，这些量子化了的能级，取决于照射在原子上的光的强度。

费曼：

理论物理最大的，也是最重要的工具之一，是废纸篮。

你必须要知道什么时候该放弃它，呵？实际上，为了发展这个理论，我几乎学习了所有我所知道的关于电学，磁学，量子力学的东西，和所有其他的东西。让我最终获得诺贝尔奖的，是在 1947 年，那时人们的一个理论——也是我想改变、修正的一个理论——遇到了一些困难，所以我想修正它。但是贝蒂发现，如果你的做法正确，如果你某些程度上忘掉一些事，同时不忘掉另一些事，如果你做得正确，你就能得到和实验相比是正确的答案。他还给了我一些建议。因为我已经尝试过这个疯狂的理论，并且把它写成了大约 655 种不同的形式，所以我这时对电动力学了解得很多，我知道如何去做他想要的，知道如何用一个非常流畅、非常便利的方法来控制并组织这个计算，我有很有力的方法。换句话说，我是的理论的方法——听起来这好像是很自然的事，而其实我已利用了我以前已经发展了的方法，我从旧理论中发展出自己经扔下那方法好几年了——这时我发现它非常有力，我用这个旧理论来处理问题，比此前曾有的其他理论快得多。

解说：

除了许多其他的事情之外，费曼博士的量子电动力学理论为我们理解把物质聚在一起的那种力提供了一个新见解。它还增加了我们对无穷小短暂粒子的性质的了解，宇宙中所有其他东西都是由这些无穷小短暂粒子构成的。随着物理学家对自然结构的探讨越来越深入，他们已经发现，那些看起来很简单的，实际上可能很复杂；而那些看起来很复杂的，实际上可能很简单。他们的工具，是高能原子粉碎机，它能够把原子级的粒子轰击成越来越小的碎片。

费曼：

一开始的时候，我们看事物，看到了许多不同的现象——风，波浪，月亮，所有这些东西。我们想重组它。风的运动像波浪的运动吗？等等。渐渐地，我们发现许多许多的事物都是相似的，它们的差异不像我们想象的那么大。我们知道了所有的现象，我们也知道了它们背后的原则，其中最有用的一个原则似乎是这样一个观念：事物都是由其他事物构成的。比如，我们发现所有东西都由原子构成，一旦知道了原子的性质，许多东西也就可以理解了。一开始，人们认为原子应该是简单的，但是后来发现，为了解释所有的现象，解释事物的各种差异，原子必须复杂一些，于是人们知道有 92 种原子。实际上，原子的种类要比这多得多，因为它们有不同的质量。接下来的一个问题，是了解原子的各种性质。我们发现，如果我们了解到原子本身也是由一些要素构成的——在这个特殊情形中，是原子核和围绕着原子核运动的电子——我们也就能理解原子的各种性质了。所有不同的原子，只是不同的电子数，这是一个漂亮的统一体。

所有不同的原子，只是同样的东西带着不同数目的电子。可是，原子核也相互不同。于是我们开始着手研究原子核。我们开始进行原子核轰击实验——卢瑟福实验等等，立即就发现了许多许多种类的粒子。从 1914 年起，他们先是发现原子核很复杂，然后又意识到，如果原子核也是由一些要素构成的，那么它们也是可以理解的。原子核是由中子和质子构成的；中子与质子之间有某种相互作用力把它们结合在一起。为了理解原子核，我们必须要对这种相互作用力有更好一点的理解。顺便提一下，就原子来说，也有一种相互

作用力，那是一种电作用力，是我们所知道的。因此，除电子之外，还有其他的电作用力，我们称之为光子。光和电作用力被整合成为一个叫光子的东西，所以外部世界，也就是说原子核外，是电子和光子。描述电子行为的理论，是量子电动力学，我就是因为这方面的工作而获得诺贝尔奖的。

但是现在我们进入原子核，发现它们可能由中子和质子构成，但是这里有这种奇怪的作用力。接下来的一个问题，是试图理解这种作用力。汤川秀树提出了各种建议，认为可能有其他种类的粒子。于是我们做实验，用高能把中子和质子轰击在一起，结果确实有新东西轰击出来了，就像我们用足够高的能量把电子撞在一起时会出来光子一样。结果我们打出了新东西，介子。因此汤川秀树好像是对的。我们继续实验。然后我们看到的是，我们得到了无数不同的粒子；你知道，不只是一种光子，我们把光子和中子轰击在一起，得到了 400 余种不同种类的粒子——λ 粒子和 σ 粒子。它们各不相同。还有 π 介子和 K 介子，等等。我们偶尔也造出了 μ 介子，但它们显然和中子、质子没有什么关系，至少不比电子与质子、光子的关系紧。那是一个奇怪的额外部分，我们搞不懂它去了哪儿。它就像是一个电子，但是又比电子重一些。所以，我们这儿就有了电子和 μ 介子，它们与其他那些粒子之间没有强相互作用。其他那些粒子我们称为强相互作用粒子，或强子。强子包括质子、中子，以及你把它们十分猛烈地撞击在一起时立即就能得到的所有粒子。现在的任务，是用某种组织形式来试验、描述所有这些粒子的性质。这是个大赌博，我们都在研究它。它叫高能物理或基本粒子物理。过去人们习惯叫它基本粒子物理，但是没有人能够相信 400 种不同要素都是基本的。另一种可能是，它们本身也

由一些更深层的要素构成。这看起来是个合理的可能。结果人们发明了一个理论——夸克理论。这个理论说，这些东西里的某些东西，比如像质子，或中子，是由三种叫做夸克的物体构成的。

解说：

至今还没有人看见过一个夸克，这太糟糕了，因为原子和分子搭成了宇宙，而夸克又是构成所有更复杂的原子和分子的基本砖块。“夸克”这个名字是费曼的同事，默里·盖尔曼，几年前随意起的。让盖尔曼博士有些惊奇的是，爱尔兰小说家詹姆士·乔伊斯早于他 30 年就已经在其著作《芬尼根守灵夜》*中预言了这个名字，其关键词是“摩斯特尔·马克的三夸克”。照费曼博士解释，既然二者如此惊人地一致，组成宇宙粒子的夸克看来真的最终是三种。在寻找夸克的过程中，物理学家用很高的能量把质子和中子撞击在一起，希望它们在撞击过程中分裂成夸克成分。

费曼：

其他都对，但有一件事情让夸克理论陷入了困境，夸克理论在这里明显很荒唐。因为如果物体是由夸克组成的，如果我们把两个质子轰击在一起，有时我们应该产生出三个夸克。结果，在我们现在谈论的这个夸克模型中，夸克的带电量十分奇特。我们所知道的自然界所有粒子，都带整数电量。通常是增加一个电子电量，或减去一个电子电量，或者不带电。但是根据夸克理论，夸克却带比如少三分之一或多

* Finnegan's Wake，爱尔兰小说家乔伊斯（James Joyce）的小说，是一部非常难懂的小说。——译者

三分之二个电子电量。如果这种粒子真的存在，应该很明显（很容易观测到），因为它经过时在泡室留下的气泡数目会小得多。比如你有一个带三分之一电子电量的粒子，它沿途抨击的原子数量就应该是 $\frac{1}{9}$——$\left(\frac{1}{3}\right)^2$。所以和一个普通粒子相比，它沿途留下的气泡只有九分之一。这是很明显的。如果你看到一条轻轻划出的痕迹，这就说明有问题了。他们一直在寻找这样的一条痕迹，但是至今还没有找到。这是个很严重的问题，也让人很兴奋。我们所走的路正确吗？或者我们完全是在黑暗之中瞎转，离正确的地方还有老远？或者我们已经到了它的近旁，只是还没有很正确地把握住它？一旦我们正确地把握住它，我们就会突然明白为什么那实验不太一样。

解说：

如果这些利用原子粉碎机和云室做的高能实验显示世界确实是由夸克构成的，那又怎么样呢？我们可不可能实际看到它们？

费曼：

至于对强子、μ 介子等的理解问题，目前我根本看不到什么实际的应用，事实上一点应用也没有。过去许多人说，可能暂时看不到它们的应用，但以后会发现它们的应用。在那样的环境下，许多人会许诺说某某东西将来肯定有用。如果说实话，他会显得很傻。我的意思是，说某个东西永远不会有什么用，这是很傻的事。所以我准备做傻瓜，宣布这些东西不会有任何应用价值。懂吗？那么你为什么要研究它

呢？因为应用不是这世上唯一的事。理解自然界如何构成，这是很有趣的事。也就是这样的兴趣，人类的好奇心，促使他们制造了电子显微镜。发现宇宙的年龄有什么实用意义？或者，那些在很远处爆炸的类星体有什么用？我的意思是，所有那些天文学有什么用？什么用也没有，但是有趣。所以，我探索我们的世界也是这样，是好奇心，是满足感。发现它之所是，在此意思上，这也是一种实际意义。目前我就是这么看待我们所做的研究的。我不会做出任何许诺，说它将会有什么经济意义上的实际用处。

解说：

至于科学本身及其对于我们的意义，费曼说他很乐意就此主题作一些哲学探讨。然而这并不妨碍他就科学是什么和科学不是什么提出一些有趣的、挑战性的观点。

费曼：

我得说，科学从它开始之日起，就是那个样子。它追求对某些对象或事物的理解，它的追求建立在这样的原则之上，即，凡是在自然中发生了的，就是真的，这是判断一个理论是否有效的法则。如果李森科*说，你把500代老鼠的尾巴都砍掉，然后新生的老鼠就没有尾巴了。（我不知道他是不是这么说的。）然后你去试验，结果不是这样，于是我们知道那理论是不正确的。这个原则——通过实验或经验把真的和假的（正确的和错误的）区分开来——这个原则，以及与这个原则相符合的知识体，就是科学。

* Lysenko（1898~1976）前苏联生物学家和农学家，前苏联科学院遗传研究所所长（1940~1964），他的遗传理论认为后天特征可以被继承。——译者

我们带给科学的，除了实验，还有无数人类才智对普遍化的诉求。所以，科学不仅仅是所有那些在实验中碰巧为真的事情的集合。科学不仅仅是我们剪掉老鼠尾巴时所发生的事实的集合，因为如果那样的话，我们脑袋里就要装太多太多的东西了。我们已经发现了大量的普遍性。比如，如果这理论对老鼠和猫来说是正确的，我们就说它对哺乳动物是正确的；然后我们发现其他动物是否也是这样，然后我们又发现植物也是这样，最后，它在一定范围内成为生命的一个特性，我们也不把它当作后天的一个特征了。但是它不是严格正确、确实正确、绝对正确。我们后来发现，有实验证明细胞能够通过线粒体或其他东西传带信息，于是我们就一边前进一边修正这理论。但同样的是，原理必须尽可能宽广，尽可能普遍，而且还要保持与实验完全符合，这才是真正的挑战。

你知道，通过实验获得事实——这听起来十分、十分简单。你只需去试，去看。但是人是一种脆弱的东西，事实证明，这个问题要比你认为只需去试和看困难得多。拿教育做例子来说，某个家伙出现了，他看到人们教数学的方法，说，“我有个更好的主意。我要做一个玩具计算机，并用这个来教他们。”于是他用一组孩子来试验他的方法，他没有找到许多孩子，也许有人给了他一个班级用来试验。他热爱他所做的事，很兴奋。他完全明白他的事业是什么。孩子们知道这是种新东西，所以他们也都很兴奋。他们学得非常非常好，他们的算术学得比其他孩子好。你做了个试验——他们学习算术。然后这就作为一个事实被记录下来——用这种方法可以改进算术教学。但是，这不是事实，因为这个实验的一个条件，即教的人就是发明了这个方法的那个特殊的

人。而你真正想知道的是，如果把这个方法写到一本针对普通教师的书上介绍出来（你必须考虑普通的教师；实际上各地都有教师，肯定有许多一般水平的教师），他们拿到这本书，然后尝试用书上介绍的方法教算术，结果是否好一些？换句话说，事实上，你所知道的各种各样关于教育，社会学，甚至心理学的事实陈述——所有这类事，我得说，它们都是伪科学。他们做了统计，他们说自己做得很仔细。他们做了实验，但他们的实验其实不是真正的受控实验。他们实验的结果，其实并不真正是受控实验下可重复的结果。他们报告所有这些材料。因为科学向来做得很仔细，而且已经表现得很成功；所以他们以为通过做一些像是科学的事，就可以获得一些荣耀。我有一个例子。

在所罗门群岛，如许多人所知道的，岛上的原住民不理解飞机。在战争期间，飞机曾降落在岛上，并给士兵们带来各种各样的好东西，所以他们现在就有了飞机祭仪。他们做了人工着陆带，并沿着着陆带点上火模仿灯光。可怜的原住民坐在他修建的一个木盒子里，戴着木制的耳机，上面有竖起的竹竿代表天线，而且他的头前后转着。他们还有木制的雷达罩顶等各种东西，希望藉此引诱飞机带给他们货物。他们在模仿动作，这也正是其他一些人做的事。让人受不了的是，我们现代在许多、许多领域的大量活动，恰恰是这种类型的科学。像航空，这是科学；而比如教育科学，这根本就没有科学。它做了大量工作，它用大量工作雕琢出那些东西，那些木头飞机。但是这并不意味着他们真的发现出什么东西。刑罚学，监狱改革——目的是要理解人们为什么犯罪。看着这世界——以我们对这些事的现代理解，我们对这世界的理解越来越多了。对教育的理解更多了，对犯罪的理

解更多了，但是考试的成绩却在下滑，监狱里的犯人在增多。年轻人在犯罪，而我们根本不了解犯罪。想以模仿的方式——他们现在正在用的方式——运用科学方法，想这样去发现那些事物的某些东西，这没有用。如果我们懂得如何用科学方法，那么科学方法在这些领域是否会有效？我不知道。在这方面，它特别脆弱。也许有某些其他方法，比如倾听过去人的想法，倾听长者的经验，这或许是个好主意。只有当你另有一个独立的信息资源，而且你已经决定走那条路时，你才可以不在意前人的想法。对于那些已经看过这事物，思考过这事物，并且不科学地得出了一个结论的人们，如果你想忽略他们的智慧，那么你得看出你是在追随谁。同样是不科学地到达一个结论，他们正确的权利，并不比你在现代社会必须正确的少。

怎么样？作为一个哲学家，我做得成功吗？

解说：

在“科学的未来”这个节目——中对诺贝尔奖得主的一系列录音访谈——你已经听了加利福尼亚理工学院的理查德费曼博士的访谈。这个访谈系列已经在美国科学促进协会资助下完成了筹备工作。

13　科学和宗教的关系

在一个思想实验中，费曼设想了一场讨论会，他采取不同的视角，表述了科学家和唯心论者的观点，讨论了科学和宗教之间的一致之处和冲突之处。科学和宗教，这两种寻求真理的方法有着根本的不同，费曼展望了未来二十年二者之间流行的、活跃的争论。在其他问题中，费曼提出了自己的疑惑：无神论者能否建立起基于其科学知识的伦理道德，就像唯心论者基于他们对上帝的信仰而建立起他们的伦理道德？对于注重实效的费曼来说，这是个非同寻常的哲学话题。

在这个专业化的年代，精通某个领域的人往往没有资格去讨论另一个领域的问题。由于这个原因，我们关于人类活动不同方面之间关系的公开讨论越来越少了。回顾过去关于这类主题的那些伟大争论，我们有点嫉妒，因为我们本该也喜欢这种争论的激情的。一些古老的问题，比如科学与宗教的关系等问题，仍然伴随着我们。我相信在这类问题上，我们面临着和过去一样的困境，但是因为专业化的制约，人们现在很少公开讨论它们了。

但是长期以来我一直对这个问题很感兴趣，所以想来讨论一下。考虑到我的宗教知识以及对宗教的理解极其有限（随着讨论的深入，我这方面的缺乏会越来越明显），我想这样来安排讨论：我要做一个假设，假设不是一个人，而是一群人在讨论这个问题，里面包括许多不同领域的专家——不同的科学学科，不同的宗教派别，等等——我们将从不同的方面来讨论这个问题，像个研讨会。每个人给出他的观点，在其后的讨论中，他的观点可能被埋葬，也可能被修正。而且我还要想象某个人受大家的推举首先发言，我就是那个被推出来做第一个发言的人。

我首先向研讨会提交一个问题：一个在宗教家庭长大的年轻人学习科学，结果对他父亲的上帝产生了怀疑——也许他后来就不信他父亲的上帝了。实际上，这不是一个孤立的例子，这样的事时时都有发生。虽然我没有这方面的统计，但我相信，许多科学家——实际上，我确信半数以上的科学家——确实不信他们父亲的上帝；也就是说，他们不信仰一个传统意义上的上帝。

既然对上帝的信仰是宗教的中心点，那么，我所提出的这个问题就使得科学和宗教的关系问题特别地尖锐起来了。

这个青年人为什么会走向怀疑？

我们可能听到的第一个答案非常简单：你知道，是科学家教的，（如我已经指出的）他们内心里都是无神论者，所以邪恶从这一个扩散到那一个了。但是如果你赞同这个看法，我就得说你对科学的了解比我对宗教的了解还要少。

另一个可能的答案是：孤陋寡闻是很危险的；这个青年人才学了一点点，却自以为知道了一切。但是不久他就会抛弃这种一知半解的诡辩，重新认识到这世界其实复杂得多，然后他又重新开始去理解一定有一个上帝存在。

我不认为这个青年人必然会走出对上帝的怀疑。我们有许多科学家——这些人希望称自己为成人，但他们也同样不信仰上帝。实际上，正如我后面要解释的那样，答案不是那个青年人自以为懂得了一切——而是恰恰相反。

你得到的第三个答案可能是这个青年人其实没有正确地理解科学。我不相信科学能够反驳上帝的存在，我觉得这是不可能的。如果科学不能证明上帝的存在为伪，那么是否意味着信仰科学和信仰上帝——日常宗教意义上的上帝——有相容的可能？

是的，是相容。尽管我说过半数以上的科学家不信上帝，但是也有许多科学家确实既信仰科学又信仰上帝，而且协调得很好。但是这种相容，尽管可能，却不容易达到。我下面想讨论两个事情：为什么这不容易达到，以及这是否值得我们去努力？

当然，在我说“信仰上帝”时，这儿总是有个疑惑——上帝是什么？我指的是那种个人的上帝，西方宗教的特征；它是你礼拜的对象，与宇宙的创生有某种联系，并在道德上引导你。

对学生来说，当他学习科学时，他在试图结合科学和宗教方面的困难有两个来源。其一：怀疑是科学的要求；把不确定性当作你内在本性的一个基本组成部分，这对科学的进步来说，是绝对必要的。为了在理解方面取得进步，我们必须保持谦逊，必须允许我们不知道。没有什么是一定的，没有什么事能够被证明在一切怀疑之外。你因为好奇而去研究；你探索，是因为它是未知的，而不是因为你知道答案。在你把更多的信息纳入科学时，这不意味着你是在发现真理，而是意味着你在发现这个或那个更可能或更不可能。

这就是说，如果我们研究更深入，我们会发现，科学所陈述的不是什么是对的或什么是不对的，科学所陈述的是我们在不同程度的确定性上所知道的："某某东西对的可能性远远高于错的可能性"；或者"某某东西几乎可以确定，但是仍有一点点怀疑"；或者——另一个极端——"这，我们真的不知道。"任何一个科学概念，都是处在绝对错误和绝对真理之间的某个刻度上，而不会处在这一端或那一端。

我相信，接受不确定性这个观念*是非常必要的，这不仅是为科学，也为其他的事情；我相信，承认自己的无知有重大的意义。事实上，在我们的生命之中，当我们做一个决定时，我们不必一定要知道我们是在做一个正确的决定；我们只是想，我们是在做得尽可能好以及，这是我们应该做的。

不确定的态度

我想，当我们知道我们确实是生活在不确定之中时，我

* 费曼非常强调"不确定性"这个观念，在许多地方讲过这个问题。——译者

们应该接受它；认识到我们不知道问题的答案，这对我们有很大价值。这样一种心灵态度——这样一种不确定的态度——对科学是至关重要的，这种心灵态度是一个学生首先必须获得的东西。它变成一个思考的习惯，一旦获得了这个观念，你就再也不可能从它退却。

然后我们就看到，那个青年人开始怀疑每一件事情，因为他不能把任何东西当作是绝对真理。于是问题就有了一个小小的变化，从“上帝存在吗？”变成“有一个上帝存在的可信度有多少？”这个非常微妙的变化，其实是重要的一击，宣告了科学和宗教之间的分途。我不相信一个真正的科学家竟然还能以从前的那种方式信仰宗教。虽然有科学家信仰上帝，但是我不相信他们理解上帝的方式会和宗教人士一样。如果他们和他们的科学保持一致，我想他们会对自己这么说：“我差不多可以确定有一个上帝存在，怀疑很小。”这和说“我知道有一个上帝存在”是很不一样的。我不相信一个科学家能够接受那个观点——那个真正的宗教性理解，那种以上帝存在为真实知识的观点——宗教人士所持的那个绝对的确定性。

当然，这个怀疑的过程并不总是以对上帝存在问题的攻击开始。通常情况下，特殊的信条，比如来生的问题，或宗教学说的细节，比如耶稣的生活细节，会首先被拿来详加审查。然而，以一种直率的方式直接进入核心问题，直接讨论怀疑上帝的存在这个更极端的观点，这更有意思。

一旦人们抛弃了绝对，而逐渐习惯于在不确定性的尺度上考虑问题，问题的结局马上改观。许多情形下，它的答案非常接近于确定；而另一方面，对有些问题来说——比如把他父亲关于上帝的理论进行细致的检讨——最终的结果，也

许就是宣布它几乎无疑是错误的。

上帝信仰——和科学事实

我们因此面临第二个困难，这也是我们的学生试图协调科学和宗教时所遇到的第二个困难：为什么这样的努力常常以失败告终？为什么对上帝的信仰——至少对宗教类型的上帝是这样——常常被认为是很不理智、很不可靠的？我认为答案与他所认识的科学事情有关所谓——科学事情，即是事实，或者部分事实。

比如，宇宙的尺度给人留下了非常深刻的印象：我们是在一个绕着太阳旋转的微小粒子上，飘游在有数百亿个太阳的银河系中，而银河系本身也是数亿个星系中的一个。

然后，生物学意义上的人与动物有很近的关系，这种动物与那种动物有着同一个生命形式。在辽阔的进化舞台上，人类是一个后来者，其他生物怎么可能仅仅是为了人的出现而搭的脚手架？

再者，所有的东西似乎都是由原子构成的，遵循着永恒的定律。没有什么东西是例外，星体是由同样的材料构成的，动物也是由同样的材料构成的，但是却这么复杂，有神秘的生命——就像我们人类。

在人之外沉思这个宇宙，思考没有人时它的意义，这是一个伟大的冒险——因为人之外的存在是它漫长历史中很大的一个部分，也是它广袤空间的主要部分。当我们最终获得了这种客观的眼光，并且能够欣赏这宇宙的神奇和高贵之后，我们再回过头去用这种客观的眼光看待人类，把生命看作这宇宙最深刻之神秘的一部分，我们会感受到一种罕见描

述过的经验。这样的观察往往以笑声结束，它是对理解的追求，看似没有价值，却让我们感到欣喜。这些科学的观察结束于敬畏与神秘，失落在不确定性的末端，但是它们又显得那么深刻，那么令人难忘，相形之下，那种以为宇宙间的一切安排，只不过是个供上帝监视人类善恶斗争的舞台的理论，似乎就不足与论了。

现在我们设想这就是我们那位特殊的学生所处的情况，他的自信心在学习科学的过程中成长起来，所以他相信，比如说，个人的祈祷是不会被听到的。（我不是想要反驳宗教的实体；我是想要提醒你设身处地地想一想为什么那么多人会认为祈祷毫无意义。）而这种怀疑的结果，必然导致伦理问题成为下一个怀疑的典型，因为在他所学的宗教里，道德问题是和上帝的命令联系在一起的，如果上帝不存在，何谈他的命令？但是，更令人惊奇的是，相比于宗教所受的冲击来说，我觉得道德问题可以说最终没有受到什么损伤。一开始的时候，学生可能认定有几个小小的方面错了，但是他后来经常推翻自己的观点，最后他的道德观点没有什么根本的差异。

这些观念（宗教观念、道德观念等）似乎有一定程度的独立性。最终，我们可能一方面怀疑基督的神圣，一方面又坚信，善待邻居是一件好事，因为这样他也会善待你。一个人同时具备这两个视角是可能的；我得说，我希望你们发现，我的那些持无神论的科学同事们在社会里常常做得很好。

尽管科学对许多宗教观念产生了某些冲击，但它对道德内容没有影响。宗教有许多的方面，它回答各种各样的问题。首先，比如，它回答关于事物本质是什么的问题，它们

从哪儿来，什么是人，什么是上帝——上帝的性质，等等。我把这叫做宗教的行而上学一面。它还教导我们另一件事——如何行为。我这里还不是指它要求我们在特定典礼上该如何行为以及该执行什么仪式，我是指它要求我们在日常生活中如何以一种道德的方式行为。它给道德问题提供答案，给出一个道德和伦理的法规，我称此为宗教的伦理一面。

我们知道，即使有确定的道德价值，人类还是很脆弱，为了让他们能不昧自己的良心，必须时时提醒他们道德的价值。这不仅仅是你有没有正确的良心那么简单，这里还有另一个问题，即你能不能保有一种力量，去做你知道是正确的事情。我们需要宗教给我们力量，给我们安慰，给我们鼓舞，去遵循这些道德观点。这是宗教的鼓舞一面，它不仅在道德行为方面给人们鼓舞，还在艺术以及各种伟大的思想和行动方面给人们鼓舞。

内在联系

宗教的这三个方面是有内在联系的。考虑到它们之间这种紧密的一体性，人们通常认为攻击这个系统中的一点就等于攻击其全体。宗教这三个方面之间的联系或多或少，大致如下：道德层面或道德法规，是上帝的命令——它把我们牵进一个形而上学问题。然后就有了鼓舞，因为他要实现上帝的意志，他是为上帝而活；他部分地感到自己与上帝同在。这是一个巨大的鼓舞，因为这使他的行为与宇宙之间获得了一种普遍的联系。

所以这三方面的事情有着十分密切的内在联系。麻烦的

是，科学有时候和三个范畴中的第一个——宗教的形而上学层面——发生冲突。比如，人们过去曾经争论地球是否是宇宙的中心——地球是绕着太阳转，还是静止？这里面有个可怕的冲突和困难，但是这个问题最终还是解决了——在这个特殊个案中，宗教最终退却了。更近一些，在人是否有动物血统这个问题上也曾发生过争执。

许多这些争论，都以宗教的形而上学的观点的退却而告终。然而尽管如此，宗教并没有崩溃。更进一步说，道德观念似乎没有发生明显的或根本的变化。

毕竟，地球是绕着太阳转的——宗教最好是迎合这一点，是不是？地球是静止还是绕太阳运转，这有什么影响？我们可以预期还会有其他的冲突出现。科学在发展，新的事物将被发现，它们可能和目前某些宗教的行而上学理论相矛盾。实际上，即便宗教在过去已经有了那么多的退却，对具体的个人来说，在他学习科学和倾听宗教之时，实实在在的冲突还是存在。事情并没有结合得很好，现实的冲突仍然存在；然而，道德没有受到影响。

事实情况是，在形而上学的宗教中，冲突的困难程度翻了一倍。首先，事实可能冲突；但是即使事实不相冲突，对事实的态度也是不一样的。科学中的不确定精神是它对形而上学问题的一种态度，这种态度和宗教所要求的确定和忠诚是不一样的。我相信，在宗教的行而上学方面——不管是事实还是精神——都有一个回避不了的冲突。

照我的看法，宗教不可能发现一套能够被证实不会与科学相冲突的行而上学观点，因为科学是永远进步而且总是在变化着的，它一直在走向一个“不知道”。我们不知道如何回答问题；我们不可能发现一个答案，而又能保证这个答案

不会在将来的某一天被发现是错的。在这里，科学和宗教是想回答同一个领域里的问题，所以困难就出现了。

科学和道德问题

另一方面，我又不相信，在伦理的层面宗教和科学会有什么真正的冲突，因为我相信伦理问题不在科学的领域之内。

我用三四个论据来说明我的理由。首先，在形而上学的方面，科学观和宗教观之间过去已有不少冲突，然而旧有的道德观念并没有崩溃，并没有改变。

第二，有些好人，实践着基督教伦理，却又不相信基督的神圣。他们发现自己在此处陷入了矛盾。

第三，尽管我相信，人们可能会把一些科学的证据解释成基督生命的某些特殊方面的证据，或者，比如解释成其他宗教的行而上学理念方面的证据，而且这些科学的证据时不时会出现；但是我还是觉得，没有什么科学证据与金箴*有关。在我看来这是有所不同的。

现在让我们来看看，我能否就其为什么不同作一点哲学的解释——为什么科学不能影响道德的根本基础？

典型的人的问题，一个宗教试图回答的问题，通常具有下面的形式：我应该不应该做这件事？我们应该不应该做这件事？政府应该不应该做这件事？为了回答这个问题，我们可以把它分解为两个部分：(一)，如果我做这件事，会怎么样？(二)，我希望这样的结果吗？它有什么价值——

* Golden Rule。金箴圣经教导说，一个人要别人如何待他，他也应该要求自己一样待别人。——译者

益处？

“如果我做这件事，会怎么样？”这种形式的问题是严格符合科学的。在诸多问题中，有一类问题可以被纳入“如果我做这件事，会怎么样？”的形式；事实上，科学可以定义为只试图回答这类问题的一种方法，以及通过回答这类问题而获得的一个信息体。其方法，从根本上来说，就是：试一试，看有什么结果。然后你再把从这些经验中获得的大量信息收集到一起。所有科学家都会同意，一个问题——任何一个问题，哲学的或其他的——如果不能被纳入那种可以用实验验证的形式（或者，简单地说，不能被纳入这种形式：如果我做了这件事，会怎么样？），它就不是一个科学问题；换句话说，它就在科学的范围之外。

我断言，不管你是希望什么事发生，还是不希望什么事发生——这事的结果有什么价值，以及你如何评判这结果的价值，（这是问题的另一端：我该不该做这事这些问题肯定都在科学的范围之外，因为这不是一个仅仅凭你知道发生了什么事就能够回答的问题，你还不得不从道德的角度去评判所发生的事。因为这个理论上的原因，所以我认为，在道德的观点——或者说宗教的伦理方面——和科学的信息之间，有一个彻底的一致性。

转到宗教的第三个方面——鼓舞层面——这是我想向虚拟的研讨会陈述的中心问题。在今天任何一个宗教里，鼓舞的源泉——为了给予力量和安慰——是和其行而上学方面密切联系的；即是说，鼓舞来源于为上帝服务，服从上帝的意志，感受到和上帝一体。在这个基础上建立起来的与道德法则的情感纽带，因为出现了对上帝之存在的怀疑而开始受到严重的削弱——哪怕是一丁点儿的怀疑。因此，当对上帝的

信仰变得不确定时，这种特殊的获得鼓舞的方法也就失败了。我不知道如何回答这个中心问题——既要维持宗教的现实价值，作为大多数人力量和勇气的源泉，而同时又不要求对其行而上学的方面绝对忠诚。

西方文明的传统

在我看来，西方的文明有两个伟大的传统为其支柱。其一是科学的探险精神——这是向未知领域的探险，一个未知的东西之所以为未知，首先是因为人们认识到它是未知的，然后才有所谓探索；这里面包含一个要求，要求人们不要去回答不能回答的宇宙秘密；这里面包含一种态度，承认一切都是不确定的；概括起来说——这是智力上的谦卑。另一个伟大的传统，是基督教伦理——以爱为行为的基础，视所有人为手足兄弟，尊重个体的价值——这是精神上的谦逊。

这两个传统，是逻辑地、彻底地一致的。但是逻辑不是一切，人的心灵需要追随一个理念。如果人们回到宗教，他们回到什么呢？对一个怀疑上帝的人，甚至不相信上帝的人来说，现在的教堂是一个给他安慰的地方吗？现在的教堂是一个能够给予这种怀疑的价值以安慰和鼓励的地方吗？迄今为止，我们不是都在借互相攻击对方的价值来汲取力量和安慰，以维持这些原本统一的传统中的这一个或那一个吗？这是不可避免的吗？我们怎么才能汲取鼓舞来支持西方文明的这两个支柱，以便它们能充满活力地并肩而立，而不互相害怕？这岂不正是我们这个时代的中心问题？

我把它提出来交给研讨会讨论。

鸣　　谢

《发现的乐趣》，对费曼的访谈编辑稿，以“地平线：发现的乐趣”为题，作为BBC2的一个电视节目播出。此次由制作人克里斯多佛·萨爱克斯，卡尔·费曼，米歇尔·费曼授权重印。

《未来的计算机器》，最初于1985年作为“纪念仁科演讲会”的一篇发表，此处承蒙K·仁科教授代表仁科纪念基金会许可重印。

《洛斯-阿拉莫斯，从基层开始》，最初发表在加利福尼亚技术研究院的《工程和科学》杂志。获准重印。

《科学文化在现代社会中扮演什么角色？它应该扮演什么角色？》，由Sociienta Italiana di Fisica授权重印。

《肯定有大量的空间》，最初发表在加利福尼亚技术研究院的《工程和科学》杂志。获准重印。

《科学的价值》，选自《你干吗在乎别人怎么想》一书，是理查德·P·费曼对拉夫·莱顿的谈话。版权©1988，格温妮斯·费曼和拉夫·莱顿。W·W·诺顿有限责任公司授权重印。

《什么是科学》，由《物理教师》授权重印，原文发表在《物理教师》第九卷，313~320页。版权©1969美国物理教师协会。

《世上最聪明的人》由奥美尼授权重印，版权©1992，

奥美尼国际股份有限出版公司。

《货拜族科学：1974 加利福尼亚理工学院毕业典礼上的演讲》最初发表在加利福尼亚技术研究院的《工程和科学》杂志。获准重印。

《和 1，2，3 一样简单》，选自《你干吗在乎别人怎么想》一书，是理查德·P·费曼对拉夫·莱顿的谈话。版权© 1988，格温妮斯·费曼和拉夫·莱顿。W·W·诺顿有限责任公司授权重印。

《科学和宗教的关系》，最初发表在加利福尼亚技术研究院的《工程和科学》杂志。获准重印。

译后赘语

2001 年初，我曾经写过一篇文章，大意是说 21 世纪的中国科学，需要呼唤科学的人文性。算起来，科学传入中国也有一百多年了，在这一百多年里，我们主要地还是在功利的层面上理解科学——从坚船利炮到“生产力”——都不离科学的应用功能。但是科学的意义实在不仅在于帮助满足我们物质方面的欲望；科学还是一种文化，是心灵的慰藉，如同艺术一样，有它超乎功利的旨趣与兴味。

从大的方面说，近代科学可以算文艺复兴结出的一个果实。文艺复兴中，人从神权和权威下解脱出来，重新发现了自己，同时也发现了一个可以理解的自然——他满怀热情地用自己的眼睛去观察自然，用自己的理性去理解自然，而不再盲信前人，不再盲信权威。经过漫长的中世纪，人类重新张开眼睛看着眼前的这个自然界，他们的眼睛像婴孩一样清澈，明亮，而且充满好奇。对我们所生活的这个世界的探索的热情，是人类共同的精神财富，在这个探索中，人认识了自然，也认识了自己，获得了伟大的成功，也付出了巨大的代价。如果说从文艺复兴（人文精神的复兴），经过启蒙运动，终于形成了近代人文精神，难道科学不是这个伟大进程中一支重要的力量么？费曼先生抱怨人们只看到科学的实际应用而忽视了科学对我们世界观的影响，他特别指出，科学

的精神与民主的精神是合拍的，都倾向于“不确定”，一种怀疑的态度。这给我们研究西方文化提供了一个新的思考角度：科学和民主，仅仅是西方文明中并峙的双峰，抑或还是血脉相连的孪生姐妹？费曼说：

> 在我看来，西方的文明有两个伟大的传统为其支柱。其一是科学的探险精神——这是向未知领域的探险，一个未知的东西之所以为未知，首先是因为人们认识到它是未知的，然后才有所谓探索；这里面包含一个要求，要求人们不要去回答不能回答的宇宙秘密；这里面包含一种态度，承认一切都是不确定的；概括起来说——这是智力上的谦卑。另一个伟大的传统，是基督教伦理——以爱为行为的基础，视所有人为手足兄弟，尊重个体的价值——这是精神上的谦逊。这两个传统，是逻辑地、彻底地一致的。
>
> ——《科学与宗教的关系》

这段话用来讲科学与民主，也是可以的。这里的谦逊，其实也是自信。从对人的方面说，不认为自己有任何凌驾于他人之上的特权或权威，这是谦逊；从对己的方面说，不认为他人有任何凌驾于自己之上的特权或权威，这是自信。尊重他人的经验，也尊重自己的经验，尊重他人的判断，也尊重自己的判断，这是科学的精神，也是民主的精神。

费曼强调怀疑的权利，他认为没有人有特权确立一个最终真理，也没有人有能力确立一个最终的真理。确实，如果没有怀疑，科学怎么能走出亚理士多德的影响？如果没有怀疑，科学在牛顿之后怎能继续前进？近代文明的一个特点，

是人们总是在新的经验基础上，不断提出自己的见解。那禁锢的文化系统里——概括起来说，在一个还不太敢于怀疑权威的环境里，能有原创性的科学发明吗？能出现开拓性的科学家吗？近代科学、近代文学、近代哲学——或者干脆一点说——近代文明，它最深刻的精神，使它和古代文明产生了质的不同的精神，应该就是这种个体的觉醒，自我的肯定。这让我想到冯友兰关于中国哲学史的划分，他说先秦是子学时代，这个时期人都还用自己的腔调说自己的话；两汉到清末是在经典中打转的经学时代，人人都依经作论，不敢用自己的腔调说自己的话。漫长的经学时代，如同西方的中古时代，人们生活在经典与权威的巨影之下，个人的智慧与热情消磨殆尽——你能指望这样的文化生态中出现有活力的么，在一个个人价值还没有充分觉醒的环境里，在一个思想大创造？你能指望这样的文化生态中成长出离不开怀疑的科学？或者，问得尖锐一点，你能指望这样的文明只要假以时日，它自己就能进化成近代文明？当然，你可以说近代文明未必就好，那我无话可说；倘若你也承认近代文明的核心价值确实有它非常重要的意义，那么你在复兴传统文化、恢复读经的时候，你就得准备面临这样的挑战——你是否看清了经学文化与近代文化的深刻区别？

从小的方面说，科学是无数才智之士科学活动的结晶。如果我们只看到这活动的结晶，而不了解活动的过程以及从事这活动的心灵，则我们仍然无法充分地理解、欣赏那结晶，我们对科学就仍然有一种隔膜。一个富于创造力的科学家，往往有一个丰富的心灵，有一个生机活泼的生活世界。我们在爱因斯坦身上看到了这种品质——他幽默风趣，而且喜欢拉小提琴；我们在费曼身上也看到了这种品质——俏皮

机敏，而且喜欢敲邦戈鼓。他们沉醉在自己喜欢的事情中，享受着极大的乐趣。费曼说：

> 科学的另一个价值是娱乐，一种被称为智力享受的娱乐。有些人在阅读、学习、思考中得到这种享受，另一些人则在科学工作中得到这种享受，这在科学的价值中，是十分真实、十分重要的一个。
>
> ——《科学的价值》

“发现的乐趣”，关键就在这个乐趣。同样是做一件事情，有许多种境界，“乐”是最高的境界，所以孔子说“知之者不如好之者，好之者不如乐之者”。只有在“乐”的境界中，你才能身心具一，真正进入你的对象、洞察你的对象，否则你与对象就只是一种外在的联系，永远有一种隔膜。比如对于科学，你如果为了能找到一份好工作而去学科学，或者出于爱国的热情而学习科学，这都还是外在的目的，而只有你打心底喜欢科学，在科学的研究中享受到极大的乐趣，这时候你才与科学了然无间，你才能创作出伟大的作品。我们常常听老师教训，做科学研究要耐得住寂寞，要能坐冷板凳。这其实是极有害的一种教育，是对科学的一种误解。我们要做的，其实不该是养成忍耐寂寞、坐冷板凳的功夫，而是要培养研究的乐趣，理解、欣赏自然之深层结构的兴味。我不相信坐冷板凳能坐出个伟大的科学家，我更不相信坐冷板凳有什么值得特别尊敬的意义，然而我相信，如果我们不能培养起欣赏自然之深层结构的乐趣，则科学永远是外在于我们的一种文化。

吸收西方科学文化的精神，把它融入到我们的文化中来，使我们的文化获得新的生命，这是近代中国知识分子努力的方向。但是一百年来，我们的成就似乎还很有限，需要更多的努力。我们的努力当然不能局限在介绍最新的科学成果，我们的努力应该涉及科学文化的方方面面，特别是在科学史方面（尤其是科学家的个案研究）该多化些力气，多作些深入的研究，以领会科学的精神，以了解科学家的灵魂。打个比方说，如果我们要养一种花草，我们总得要在自己的园地里造成适合这花草生成的土壤，让它能在这里生根发芽，开花结果，而不能老是想着从别人的园地里摘一枝来插在花瓶里。科学史的研究就是为科学的园地培育土壤。所以我常常觉得，为了让科学文化能够在我们自己的家园里生根发芽、开花结果，我们当然需要一批优秀的人才来从事科学的研究，而同时我们也需要一批优秀的人才来从事科学史的研究。在翻译这本书的过程中，我因为查找日本物理学家仁科芳雄（Yoshio Nishina）的材料，看到韩国高等科学和技术研究院的金东文先生（Dong-won Kim）的一篇文章，这篇文章讲述了他如何花费十年的时间研究西官先生并写成西官的传记。这很让我感慨，就我所知，国内还从未有人做过如此细致而深入的个案研究——我们的科学史研究这片园地还相当荒芜寂寞。

费曼当然是值得我们细细品味的大师，他不仅深刻，而且有趣。他的深刻，不仅体现于他在物理方面的思考，也体现于他对科学文化的思考。他的有趣，不仅在于他喜欢撬保险柜、敲邦戈鼓、咧嘴大笑，还在于他科学研究中的痴迷沉醉之态，以及他富于艺术兴味的科学风格。

这本书的翻译让我受益良多，然而因为英文能力的限制

和物理知识的薄弱，也让我在翻译的过程中吃尽了苦头，所以我的翻译其实是“勉为其难”了。

译者

2005年8月10日



《发现的乐趣》是费曼短文精品的一个豪华宝藏——从访谈、演讲，到报告以及发表的文章。这个集子收罗广泛，包罗万象，它向我们展现了一个神秘、迷人的科学人生景象——一个与众不同的人生。

读着这些才气横溢的短篇，我们在活动中见证费曼的天才。通过费曼自己的话，我们得窥第二次世界大战期间洛斯-阿拉莫斯内部的圈子，那些顶级的科学家奋力拼搏，抢在德国人前面发明了原子弹。我们读到肆无忌惮的费曼如何戏谑胡闹的第一手叙述——撬保险柜，鬼鬼祟祟地虚构女人住进了男人宿舍的假象，用密码和滑石粉折磨美国检查官……好多好多这样的故事。

我们了解到，在科学家的孩提时代，他的父亲如何以带他认识这个世界为乐，而他，那个小男孩，如何享受“发现出事物”的巨大乐趣。

我们还看到了处在最佳科学状态时的费曼，他宣讲他对未来计算机的前瞻（这种预测已经部分成为了现实），他对科学价值的看法，以及他在挑战者号航天飞机爆炸一事上的结论。在每一篇中，我们都体验着费曼，分享他诡谲的语言和深刻的思想。

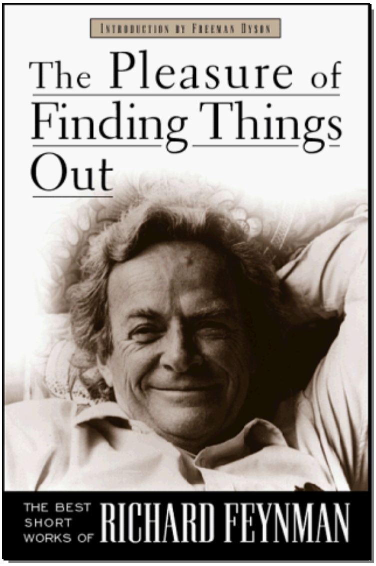
费曼已经被誉为20世纪最有影响的人物之一。没有什么能够比他的话更适于记录这个时代的精神，科学上的进步或者我们文化上的里程碑。

策划/陈刚　责任编辑/吴炜　贾平静
整体设计/吴新霞　封面插图/张卓明

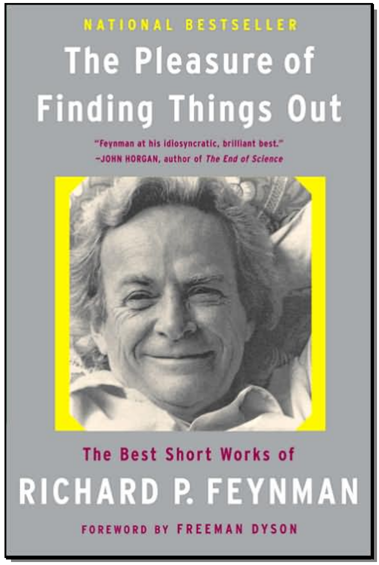
ISBN 7-5357-4415-X

9 787535 744159 >
N·134　定价：19.00元

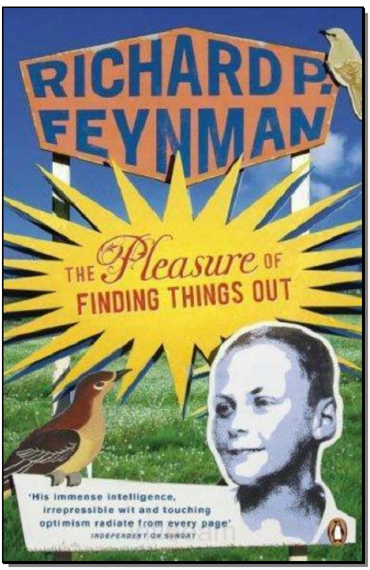
书　影



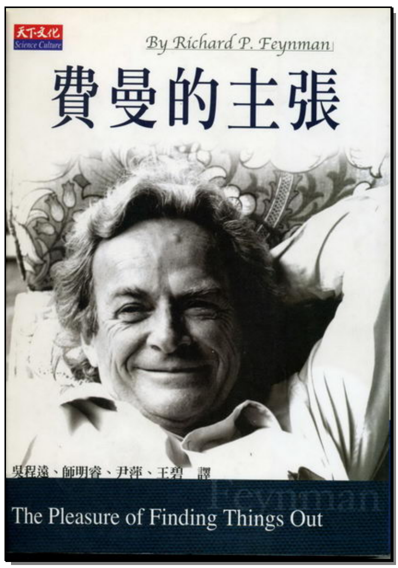
INTRODUCTION BY FREEMAN DYSON
The Pleasure of Finding Things Out
THE BEST SHORT WORKS OF
RICHARD FEYNMAN



NATIONAL BESTSELLER
The Pleasure of Finding Things Out
"Feynman at his idiosyncratic, brilliant best."
—JOHN HORGAN, author of The End of Science
The Best Short Works of
RICHARD P. FEYNMAN
FOREWORD BY FREEMAN DYSON



RICHARD P. FEYNMAN
THE Pleasure OF FINDING THINGS OUT
'His immense intelligence, irrepressible wit and touching optimism radiate from every page'
INDEPENDENT ON SUNDAY



天下文化
Science Culture
By Richard P. Feynman
費曼的主張
吳程遠、師明睿、尹萍、王碧　譯
The Pleasure of Finding Things Out

读书中文网
www.rbook.net

珍爱书籍，开卷有益，请支持正式出版物。

《发现的乐趣》一校版，精确版面还原

全书由 凡剑（Ken777）OCR、一校、排版制作。

2009年12月26日一校

Ken777
2009.12.26
eBook